

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 145 (1994)
Heft: 9

Artikel: Zweites Schweizerisches Landesforstinventar : Optimierung des Stichprobenplanes unter dem Gesichtspunkt der Kosteneffizienz
Autor: Köhl, Michael / Scott, Charles T. / Brassel, Peter
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-766625>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Zweites Schweizerisches Landesforstinventar: Optimierung des Stichprobenplanes unter dem Gesichtspunkt der Kosteneffizienz

Von *Michael Köhl, Charles T. Scott und Peter Brassel*

FDK 524.6: (494)

1. Einleitung

Forstliche Nationalinventuren liefern landesweite, repräsentative Informationen über den Wald. Die Ziele der Inventur leiten sich vom Informationsbedarf ab und werden im Idealfall von den Auftraggebern der Erhebung festgelegt. Der Auftraggeber für das Landesforstinventar (LFI) ist das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Mit der methodischen Vorbereitung, der Durchführung und der Auswertung der Daten ist die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) betraut. Sind die Inventurziele festgelegt, kann die Planung der Inventur beginnen. Im LFI wurde bereits während der Publikation der Resultate der Erstaufnahme mit der Entwicklung der Stichprobenmethode für die Zweiterhebung begonnen.

Ziel der Inventurplanung ist die Entwicklung eines «optimalen» Stichprobenplanes, der es ermöglicht, mit einem vorgegebenen Budget die gewünschten Merkmale (Variablen) mit möglichst geringem Fehler herzuleiten. Die Inventurplanung muss neben den Kosten (als strengste Randbedingungen) den Fehlerrahmen, die Charakteristik der zu erhebenden Wälder, das verfügbare Personal und die geographischen oder thematischen Einheiten für die Resultate berücksichtigen.

Der Beitrag konzentriert sich nicht auf den Prozess der Zielfindung beim LFI (siehe hierzu insbesondere *Brassel, 1991*), sondern beschreibt die Optimierung des Stichprobenplanes aus der Sicht der Methodenentwicklung. Obwohl die Ziele, das verfügbare Budget und die forstlichen Randbedingungen bei jeder Inventur verschieden sind, gibt es dennoch allgemeingültige Regeln, die bei der Planung einer Erhebung angewendet werden sollten.

Bevor man mit der Planung einer Inventur beginnt, sollten die Ziele der Inventur klar definiert sein. Eine Liste und Definitionen der zu erhebenden Variablen, das Auswertekonzept, die erwartete Genauigkeit sowie das ver-

fügbare Budget müssen bekannt sein. Dieser Idealfall wird in der Praxis aber kaum eintreten. Die Zielfindung ist ein Prozess, der sich über die gesamte Vorbereitungsdauer erstreckt; die Finanzierung ist häufig erst kurz vor Inventurbeginn gesichert; vielfach werden «in letzter Minute» zusätzliche Informationsbedürfnisse formuliert oder die verfügbaren Mittel für die Erhebungen gekürzt. Die erhobenen Daten sollten demzufolge die im Raum stehenden Informationsbedürfnisse und Fragen optimal befriedigen. Im Gegensatz zu vielen anderen Nationalinventuren bestand beim zweiten Landesforstinventar schon lange ein Konsens bezüglich der Informationsbedürfnisse. Allerdings wurde das definitive Budget schliesslich erst relativ kurz vor Beginn der Erhebung bekanntgegeben. Dies stellte hohe Anforderungen an die Planung der Inventur; sie musste daher sehr flexibel erfolgen, um eine definitive Festlegung der optimalen Anzahl von Proben im Luftbild und im Wald in einer späten Planungsphase zu ermöglichen.

Bei der Planung des zweiten Landesforstinventars standen mehrere Stichprobenverfahren zur Auswahl. Die Unterschiede der Verfahren betreffen die Wahl der Aufnahmeeinheiten (zum Beispiel Proben mit fester Fläche, Winkelzählproben), den Stichprobenumfang und die Auswahlregeln; sie können hinsichtlich Kosten und erzielbarer Genauigkeit verglichen werden. In diesem Beitrag werden verschiedene Stichprobenverfahren, die für nationale Forstinventuren geeignet sind, beschrieben, Methoden zur Optimierung der einzelnen Varianten vorgestellt und Regeln für die Auswahl des optimalen Designs diskutiert. Der Beitrag soll weiterhin zeigen, dass bei der Planung des zweiten Landesforstinventars nicht plötzlich ein Inventurverfahren als die einzig adäquate Variante im Raum stand, sondern dass aus einer Reihe von Varianten das für die Zwecke des zweiten LFI bestgeeignete Verfahren nach objektiven Entscheidungsregeln ausgewählt wurde.

2. Stichprobenverfahren

Grossräumige Forstinventuren werden üblicherweise zur Erfassung der Waldfläche, des stehenden Vorrats und von weiteren Merkmalen zur Beschreibung der Produktionsfunktion des Waldes geplant. Häufig werden zusätzliche Angaben zum Zuwachs, zur Mortalität und zur Nutzung benötigt. Diese Informationen können durch Erhebungen von terrestrischen Waldproben gewonnen werden. Luftbilder wurden für Grossrauminventuren als wichtige Datenquelle vorgeschlagen. Die Kombination von Luftbildern und terrestrischen Erhebungen kann zu einer erheblichen Effizienzsteigerung führen.

Hier werden drei wichtige Auswahlverfahren behandelt: Die einfache Zufallsauswahl (engl: *simple random sampling*), die stratifizierte Zufallsauswahl (engl: *stratified random sampling*) und das zweiphasige Stichprobenver-

fahren zur Stratifizierung (engl: *double sampling for stratification*). Bei Forstinventuren werden in der Regel systematisch verteilte Proben erhoben. Die Anwendung von Schätzverfahren, die auf der uneingeschränkten Zufallsauswahl basieren, führt zu einer Überschätzung der Stichprobenfehler. Verfahren mit ungleichen Auswahlwahrscheinlichkeiten werden nicht diskutiert, da sie auf Grund ihrer Komplexität für grossräumige Erhebungen nicht empfohlen werden können.

Bei der einfachen Zufallsauswahl haben alle Probeflächen die gleiche Auswahlwahrscheinlichkeit. Bei der stratifizierten Zufallsauswahl wird die Population (Fläche des interessierenden Gebietes) in homogene Untereinheiten, sogenannte Straten, mit bekannter Grösse (Fläche) unterteilt. Innerhalb der Straten wird eine Zufallsstichprobe gezogen. Bei zweiphasigen Stichprobenverfahren zur Stratifizierung wird zunächst auf einer ersten Erhebungsebene (Phase 1) eine Stichprobe mit grossem Umfang gezogen, die ausgewählten Proben werden Straten zugeordnet. Die Proben dieser ersten Phase dienen zur Schätzung der Stratengrösse. Auf einer Unterstichprobe der Phase-1-Proben wird die Zielvariable erhoben. Bei Forstinventuren werden die Phase-1-Proben meist auf Luftbildern ausgewählt und den Straten zugeordnet, die Phase-2-Proben sind terrestrische Waldproben, auf denen Einzelbaumdaten und Flächendaten erhoben werden.

Diese drei Auswahlverfahren können sowohl für Erstaufnahmen als auch für Folgeinventuren angewendet werden. Folgeinventuren können als Erhebungen mit unabhängigen, das heisst nicht versicherten, temporären Proben geplant werden (Köhl, 1990), allerdings wird mit temporären Proben die Genauigkeit für die Schätzung von Veränderungen meist sehr unbefriedigend sein. Stott (1947) schlug vor, alle Proben der Erstaufnahme bei Folgeinventuren wieder aufzunehmen. Dieses Verfahren ist im angloamerikanischen Sprachraum als *Continuous Forest Inventory (CFI)* bekannt und führt bei der Schätzung von Zuwachs und Zuwachskomponenten zu einer relativ hohen Genauigkeit. CFI wurde von Schmid (1967, 1993) für Betriebsinventuren für europäische Verhältnisse weiterentwickelt. Die von ihm entwickelte Methode wird als Kontrollstichprobe bezeichnet und hat wesentlich zur Verbreitung von Stichprobeninventuren zur Informationsbeschaffung bei der forstlichen Planung beigetragen.

Eine flexiblere Variante als CFI wurde von Patterson (1950) vorgestellt und in der forstlichen Literatur von Ware und Cunia (1962) als Stichprobenkonzept mit teilweisem Ersatz von Probeflächen (*Sampling with Partial Replacement, SPR*) eingeführt. Dabei wird in der Folgeaufnahme nur ein Teil der Proben der ersten Aufnahme wieder erhoben, die nicht wieder aufgenommenen Proben werden durch neu ausgewählte Proben ersetzt (Scott, 1984; Köhl, 1990). Ein ähnlicher Ansatz wird bei der dritten und allen weiteren Folgeaufnahmen angewendet. Über die Beziehung, die zwischen den beiden Beobachtungen auf den wiederholt aufgenommenen (permanenten) Proben

besteht, werden die nicht wieder aufgenommenen Proben aktualisiert, wodurch die Schätzung von Zustandswerten und Veränderungen verbessert wird. SPR erweist sich aber hinsichtlich der Fortschreibung der nicht besuchten Proben bei zunehmender Anzahl Inventurzyklen als äusserst komplex und ist deshalb für Grossrauminventuren nur beschränkt geeignet (Scott und Köhl, 1994). Sowohl CFI als auch SPR können mit den drei oben beschriebenen Auswahlverfahren kombiniert werden.

3. Optimierung des Stichprobenplanes

Die Wahl einer optimalen Verfahrensvariante kann durch verschiedene Methoden erfolgen, wobei idealerweise eine rationale, nachvollziehbare Entscheidung getroffen werden sollte, die von objektiven Entscheidungsregeln bestimmt ist. Es versteht sich von selbst, dass eine Wahl nur dann erfolgen kann, wenn bei der Entscheidungsfindung eine Alternative zur Verfügung steht.

Die Optimierung des Stichprobenplans hat die Steigerung der Kosteneffizienz zum Ziel. Die Kosteneffizienz wird als die relative Effizienz zwischen zwei Designvarianten beschrieben. Für gegebene Kosten ist die relative Effektivität von Variante A gegenüber der Variante B die Varianz von Variante B dividiert durch die Varianz von Variante A (Cochran, 1977, Seite 103). Daher sind sowohl Angaben zu den Kosten als auch zu den Varianzen notwendig, um Designvarianten vergleichen zu können.

Beim Vergleich von Stichprobenvarianten dürfen nur die Kosten in Betracht gezogen werden, welche mit dem Stichprobenumfang variieren. Fixkosten, die bei allen Varianten gleich sind und sich nicht mit dem Stichprobenumfang ändern, müssen ausgeschlossen werden (Wöhe, 1981). Beispiele für Fixkosten sind die Löhne der permanenten Stabsmitarbeiter, die Kosten für die Programmierung der Auswertungssoftware oder die Kosten für die Erstellung einer Aufnahmeinstruktion. Werden zwei Varianten verglichen, die beide die Datenerfassung im Luftbild vorsehen, gilt der Aufwand für die Orientierung der Luftbildpaare ebenfalls als Fixkostenanteil und darf nicht in die Optimierung einfließen. Wird hingegen ein kombiniertes Verfahren mit einem rein terrestrischen Verfahren verglichen, sind die Kosten für die Orientierung verfahrensabhängig und bei der Optimierung zu berücksichtigen. Eine generelle Kostenfunktion für zweiphasige Stichprobenverfahren zur Stratifizierung bei zwei Inventurzeitpunkten ist

$$C = C_p n' + C_{12} n_{12} + C_{-2} n_{-2}$$

mit

C = gesamte variable Kosten

C_p = Kosten für die Interpretation einer Luftbildprobe

C_{12} = Kosten für die Erhebung einer permanenten, terrestrischen Probe

C_{-2} = Kosten für die Erhebung einer neuen, (temporären), terrestrischen Probe

n' = Anzahl der Luftbildproben

n_{12} = Anzahl der permanenten Proben

n_{-2} = Anzahl der temporären Proben

Für jede Variante existiert eine optimale Kombination von Stichprobenumfängen. Diese Kombination muss mit der Alternative verglichen werden. Das Optimum kann auf zwei Arten bestimmt werden:

- Minimierung der Kosten bei vorgegebener Genauigkeit, oder
- Minimierung des Fehlers bei vorgegebenen Kosten.

Es handelt sich hierbei um die Standardform eines Optimierungsproblems: die Minimierung einer Zielfunktion unter definierten Bedingungen. In einfachen Fällen kann die Lösung durch den Lagrange-Ansatz analytisch hergeleitet werden. Cochran (1977) präsentiert solche Lösungen für zweiphasige Stichproben zur Stratifizierung. Ware und Cunia (1962) zeigen Lösungen für SPR bei zwei Zeitpunkten, *Bickford et al.* (1963) leiten Lösungen für zweiphasige Stichproben zur Stratifizierung kombiniert mit SPR bei zwei Zeitpunkten her.

In komplexeren Fällen müssen numerische Methoden angewendet werden. Die klassische Methode ist die lineare Programmierung, wobei eine lineare Zielfunktion mit linearen Gleichheits- oder Ungleichheitsbedingungen vorliegt (*Hillier und Lieberman*, 1974). Diese Methode ist nur beschränkt anwendbar, da bei vielen Optimierungsproblemen die Zielfunktion oder die Bedingungen nicht linear sind oder ganzzahlige Lösungen gefordert werden.

Scott und Köhl (1993) diskutieren die Anwendung der *m*-Neighborhood-Methode (*Garfinkel und Nemhauser*, 1972), eine Methode der ganzzahligen nicht-linearen Programmierung, im Kontext von Forstinventuren. Mit dieser Methode werden alle Kombinationen von *m*-Punkten oberhalb und unterhalb von Vorgaben für die einzelnen Variablen bezüglich der Kombination getestet, welche die Zielfunktion minimiert. Die vorgegebene Einstellung wird solange variiert, bis keine weitere Verbesserung erzielt werden kann. Die *m*-Neighborhood-Methode garantiert nicht das Auffinden des globalen Optimums, stellt aber eine Verbesserung gegenüber dem vorgegebenen Startpunkt sicher.

Zur Optimierung von Stichprobenverfahren wurde im Rahmen der Vorbereitungen des zweiten Landesforstinventares von Scott und Köhl (1993) ein

spezielles Programm (SIZE) entwickelt, das die Herleitung von optimalen Stichprobenumfängen für drei verschiedene Stichprobenmethoden (einfache Zufallsauswahl, stratifizierte Zufallsauswahl und zweiphasige Stichproben zur Stratifizierung) bei einem, zwei oder drei Zeitpunkten erlaubt. Sowohl SPR- als auch CFI-Schätzer können verglichen werden. Das Programm verlangt Angaben zur Population, den Kostenkoeffizienten und über die Variabilität der Zielgrösse. Dieser Ansatz erlaubt neben dem einfachen Vergleich verschiedener Designvarianten die Durchführung von Sensitivitätsanalysen; durch die Variation der Eingangsgrössen können die Auswirkungen auf die Kosteneffizienz untersucht werden. So können Designvarianten gefunden werden, die nur unter sehr eng gefassten Bedingungen eine Optimallösung darstellen. Für Inventurzwecke sollten Lösungen bevorzugt werden, die auch bei Änderungen der Eingangsgrössen über einen weiten Bereich nicht zu stark von der Optimallösung abweichen und kosteneffizient bleiben.

Vor der Optimierung von Designvarianten mit Hilfe des von Scott und Köhl (1993) entwickelten Modelles muss eine Reihe von Vorgaben getroffen werden; zunächst ist der Stichprobenumfang getrennt für jedes Stratum vorzugeben. Sind Resultate nicht nur für die Gesamtpopulation (zum Beispiel Schweizer Wald), sondern auch für Subpopulationen (zum Beispiel Produktionsregionen) herzuleiten, sind auch für die einzelnen Subpopulationen die Stichprobenumfänge in den Straten zu definieren. Die so festgelegten Stichprobenumfänge dienen zwei Zwecken:

1. der Bestimmung der Startpunkte für die Optimierung und
2. der Bestimmung der Anteile des Stichprobenumfangs in den einzelnen Straten.

Das Programm SIZE sieht die Aufteilung der Gesamtpopulation (betrachtete Waldfläche) in bis zu drei Subpopulationen vor, zum Beispiel Produktionsregionen oder Kantone. Soll stratifiziert werden, sind neben der Anzahl der Straten die Gesamtfläche (Wald- und Nichtwaldflächen) des Gesamtgebildes sowie der Subpopulationen vorzugeben.

Der Anteil der Waldfläche an der Gesamtfläche wird verwendet, um die Anzahl Waldproben und Nichtwaldproben für die Kostenfunktionen zu bestimmen. Das Modell berücksichtigt drei Kostenkoeffizienten, die für jede Subpopulation unterschiedlich sein können. Die Kosten für die Interpretation einer Luftbildprobe sollten den Aufwand für die Lokalisation jeder Luftbildprobe, die Interpretation und die Digitalisierung der Daten umfassen. Kosten für die Beschaffung der Luftbilder und die Erfassung von Passpunkten für die Orientierung der Luftbilder dürfen nicht berücksichtigt werden, da diese Komponenten den Fixkosten zuzuordnen sind. Die Kosten für die Datenerhebung auf permanenten und temporären Waldproben sollten sich wie folgt zusammensetzen: die Arbeitszeit der Feldaufnahmegruppen, die für das Aufsuchen der Probe benötigt wird, die Erhebung und Digitalisierung der Daten,

der Gebrauch von Fahrzeugen, der Gebrauch von mobilen Datenerfassungsgeräten, Spesen und Kontrollaufnahmen.

Die schwierigste Vorgabe stellt die Angabe zur Variabilität der Zielgrößen dar. Um mit dem Modell die zu erwartende Genauigkeit jeder Stichprobenalternative zuverlässig zu schätzen, ist die Varianz getrennt für jedes Stratum und jede Subpopulation für die Zielvariablen (Vorrat, Stammzahl, Grundfläche usw.) zu spezifizieren. Diese Vorgaben konnten aus den Daten des ersten Landesforstinventares und den Erhebungen im Rahmen der Waldschadeninventur berechnet werden. Für jede Zielvariable muss zudem festgelegt werden, ob sie zur Beschreibung des Zustandes oder von Veränderungen verwendet werden soll.

4. Optimierung des Stichprobendesigns für das zweite Landesforstinventar

Da die Entwicklung jeder Stichprobenvariante ein zeitaufwendiger Prozess ist, wird bei vielen Inventuren in der Vorbereitungsphase der Fehler begangen, sich sehr früh auf ein einziges Design festzulegen. Oft ist dann im nachhinein nicht mehr klar, wieso dieses Design ausgewählt wurde. Die Wahl einer Variante ist dann nicht mehr allein durch Optimierungsgedanken begründet.

Mit dem oben beschriebenen Modell wurden verschiedene, speziell auf das LFI abgestimmte Varianten untersucht. Der Aufwand für die Entwicklung verschiedener Designvarianten konnte durch das speziell für das Landesforstinventar entwickelte Fortranprogramm «SIZE» erheblich verringert werden, und es konnten mehrere Varianten verglichen werden. Jede einzelne Variante wurde für ein gegebenes Budget optimiert und durch den Vergleich der Kosteneffizienz das für das zweite Landesforstinventar optimale Verfahren ausgewählt. Im folgenden sollen kurz die Vorgaben zur Designentwicklung vorgestellt, verschiedene Varianten präsentiert und die endgültige Entscheidung diskutiert werden.

4.1 Vorgaben

Für die Durchführung des zweiten Landesforstinventars steht ein Gesamtbudget von 8 Mio. sFr. zur Verfügung, das nominell dem Budget des ersten LFI entspricht. Wird das Budget des ersten LFI mit der Teuerung korrigiert, waren vor 10 Jahren bezogen auf die heutigen Lohnkosten 11,2 Mio. sFr. verfügbar. Real ergibt sich somit für die Durchführung des zweiten Landesforstinventars eine Budgetreduktion um 3,2 Mio. sFr.

Vom Gesamtbudget müssen die Fixkosten subtrahiert werden, so dass für die Optimierung als variabler Kostenanteil 3 Mio. sFr. berücksichtigt werden können. Der Fixkostenanteil von 5 Mio. sFr. erscheint zunächst sehr hoch; er umfasst aber nicht nur die Stabskosten während der Feldaufnahmen, sondern auch die Kosten für die Vorbereitung und Planung der Folgeerhebung, die Auswertung der Daten und die Publikation der Resultate sowie die gesamte Infrastruktur.

Die Kosten für die Interpretation einer Luftbildprobe sind für die gesamte Schweiz konstant. Der Wald-/Nichtwald-Entscheid und die Festlegung von Referenzpunkten im Luftbild für die Feldaufnahmen haben sich im ersten LFI bewährt, denn durch die Einsparung von unproduktiven Zeiten beim Aufsuchen von Nichtwaldproben und bei der Einmessung der Stichprobezentren wurden im ersten LFI die Kosten der Luftbildinterpretation aufgewogen (Mahrer, mündlich). Da diese Einsparungen auch im zweiten LFI erzielt werden können und die Methode der Flächenschätzung mit Luftbildern beibehalten werden muss, sind für die Optimierung nur die zusätzlichen Interpretationskosten zur Bestimmung der Stratengrösse den Luftbildstichproben zugerechnet. Der Zeitaufwand für die Interpretation einer Luftbildprobe beträgt etwa 4,5 Minuten entsprechend 5 sFr.

Im Gegensatz zur Luftbildinterpretation sind die Kosten der Feldaufnahmen nicht für die gesamte Schweiz konstant, sondern unterscheiden sich je nach Zugänglichkeit und Topographie. Die Kosten sind auch für permanente und temporäre Proben unterschiedlich. Für die Optimierung wurden die in *Tabelle 1* dargestellten Kosten verwendet.

Tabelle 1. Kosten für die Aufnahme einer Waldprobe (in sFr.).

<i>Region</i>	<i>permanente Probe</i>	<i>temporäre Probe</i>
Jura	345	525
Mittelland	345	480
Voralpen	400	600
Alpen	480	600
Alpensüdseite	545	670

Zusammenstellung: H. R. Stierlin

Die Varianzen wurden getrennt nach Produktionsregionen (Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen, Alpensüdseite) und Straten berechnet. Stratumsbildend sind der Deckungsgrad, die Entwicklungsstufen, der Bestandestyp, der Schlussgrad und der Mischungsgrad. Die Varianzen in den Straten wurden mit den Daten des ersten LFI bestimmt. Eine Luftbild-Pilotinventur zeigte, dass die Varianzen für Luftbildstratifizierungen und die terrestrische LFI-Stratifizierung vergleichbar sind, womit die Verwendung der terrestrisch bestimmten LFI-Straten gerechtfertigt ist. Anhand des Datensatzes des ersten LFI wurde

die Standardabweichung der einfachen Zufallsauswahl (für die Gesamtpopulation) und der zweiphasigen Stichprobe (für die einzelnen Straten) berechnet.

Die relative Stratengrösse wurde aus dem LFI-Datensatz bestimmt. Dabei wurde auch das Nichtwaldstratum eingeschlossen. Als Zielvariablen für die Optimierung wurden die Stammzahl, die Basalfläche und der Vorrat berücksichtigt. Die Stichprobenfehler beziehen sich auf Quotientenschätzer, das heisst Werte mit Flächenbezug wie Vorrat (m^3/ha), Basalfläche (m^2/ha) und Stammzahl (n/ha). Da die Schlüsselgrössen Vorrat, Stammzahl und Basalfläche entweder auf eine einheitliche Flächeneinheit bezogen (m^3/ha , n/ha , m^2/ha) oder für die Gesamtwaldfläche hochgerechnet werden, ist im zweiten LFI neben den Stichprobenfehlern der Variablen auch die Berücksichtigung der Flächenschätzfehler vorgesehen. Bei der Schätzung von Veränderungen müssen zusätzlich die Korrelationskoeffizienten zwischen den Werten der Erstaufnahme und den Werten der Zweitaufnahme berücksichtigt werden. Zur Abschätzung der Korrelationskoeffizienten wurden die Daten des Landesforstinventars (1983 bis 1985) und die Daten der Waldschadeninventur (WSI) 1991 beigezogen. Es standen insgesamt 723 Probeflächen zur Verfügung. Bei der Herleitung von Korrelationen zwischen den Zielgrössen des ersten und des zweiten LFI ist zudem das Problem unterschiedlicher Zeitintervalle (6 bis 8 Jahre) zu berücksichtigen.

4.2 Designvarianten

Für die Herleitung verschiedener Designvarianten wurden die einfache Zufallsauswahl und das zweiphasige Stichprobenverfahren zur Stratifizierung als Auswahlverfahren berücksichtigt. Die stratifizierte Zufallsauswahl fiel ausser Betracht, da hierfür eine aufwendige Bestimmung der Straten im Luftbild notwendig wäre, für die nach groben Aufwandschätzungen etwa 50 Personenjahre (diese entsprechen etwa 4 Mio. sFr.) investiert werden müssten. Die einfache Zufallsauswahl entspricht dem einstufigen Verfahren des ersten Landesforstinventars. Zwar handelt es sich beim Landesforstinventar streng genommen um eine systematische Stichprobe; die Anwendung der Zufallsformeln für die Fehlerberechnung führt somit zu einer geringen Überschätzung der Stichprobenfehler. Nach Gertner und Köhl (1992) kann diese Überschätzung toleriert werden, da sich andere bei der Herleitung der Stichprobenfehler nicht berücksichtigte Fehlerkomponenten wie Messfehler oder Vorhersagefehler auf das gesamte Fehlerbudget stärker auswirken.

Als Designvariante wurden sowohl für die einfache Zufallsauswahl als auch für das zweiphasige Verfahren die Schätzung von Zustandswerten und Veränderungen mit den CFI- und SPR-Algorithmen berücksichtigt. Da die Schätzung der Zielgrössen mit den SPR-Algorithmen zu erheblichen prakti-

schen Problemen wie nicht additiven Tabellen führt (Köhl, im Druck), sollten SPR-Schätzer nur bei einer erheblich grösseren Reduzierung der Standardfehler verwendet werden, als dies im zweiten LFI prognostiziert werden kann.

Ein direkter Vergleich der Stichprobenfehler mit den Fehlerangaben in der Publikation der Ergebnisse der Erstaufnahme (EAFV, 1988) wird nicht möglich sein, da im ersten LFI auf die Einbeziehung des Flächenschätzfehlers verzichtet wurde. In *Tabelle 2* sind für den Vorrat die Fehlerangaben des ersten LFI mit und ohne Flächenschätzfehler ersichtlich.

Tabelle 2. Schätzungsfehlerprognose für den Gesamtvorrat (doppelter Standardfehler).

Einphasige Inventur

terrestrisch	1000 mal 1000 km
Prognose LFI 1	1,0 % ohne Flächenschätzfehler
berechnet LFI 1	1,4 % ohne Flächenschätzfehler
berechnet LFI 1	2,0 % mit Flächenschätzfehler

Zweiphasige Inventur

erste Phase Luftbild	0,500 mal 0,500 km
zweite Phase terrestrisch	1,414 mal 1,414 km
Prognose LFI 2	1,5 % 2phasiges Stichprobenverfahren zur Stratifizierung

Für die Optimierung des LFI wurden verschiedene Stichprobenpläne untersucht; hier werden exemplarisch drei Varianten vorgestellt:

a) Einphasiges Stichprobenverfahren:

Dieses Verfahren bezieht keine Luftbildstratifizierung ein und entspricht dem statistischen Design des ersten LFI. Die Zielgrössen werden auf terrestrischen Proben erfasst, das Luftbild wird ausschliesslich für die Bestimmung der Waldfläche und der Waldflächenanteile verwendet.

b) Zweiphasiges Stichprobenverfahren zur Stratifizierung (DSS) mit permanenten Proben:

Hier werden Luftbildproben zur Schätzung der Stratengrösse verwendet. Es werden die permanenten Proben des ersten LFI herangezogen. Stehen für die Feldaufnahmen und die Luftbildinterpretation mehr als 6 Mio. sFr. zur Verfügung, müssen ab dieser Kostenschwelle zusätzlich neue (temporäre) Proben aufgenommen werden.

c) Zweiphasiges Stichprobenverfahren zur Stratifizierung mit permanenten und neuen Proben:

Die Anzahl neuer Proben wird zunächst mit 1000 Proben konstant gehalten. Ab einer bestimmten Kostenschwelle kann analog zu Variante b die Anzahl permanenter Proben erhöht werden, bis die Gesamtkosten erreicht werden.

Sämtliche Zustandswerte werden ohne die Verwendung der SPR-Option geschätzt, das heisst es erfolgt kein Update der bei der Folgeinventur nicht wieder aufgenommenen permanenten LFI 1 Proben.

In den *Abbildungen 1* und *2* sind für die drei Stichprobenalternativen die prozentualen Standardfehler für die Schätzung des Vorrates (*Abbildung 1*) und die Schätzung der Stammzahl (*Abbildung 2*) über den (variablen) Kosten aufgetragen. Für den Vorrat resultieren bei gleichen Kosten geringere Standardfehlerprozentage als für die Stammzahl, der Verlauf der Kurven ist aber für beide Merkmale ähnlich. Die zweiphasigen Verfahren gehen bei Kosten von 6 Mio. sFr. ineinander über, da mit diesen Kosten nicht nur alle 11 000 permanenten Proben des ersten LFI, sondern auch neue Proben aufgenommen werden können.

Mit dem einphasigen Verfahren (Variante a) resultieren verhältnismässig hohe Standardfehler. Die zweiphasigen Verfahren sind in allen Fällen kosteneffizienter. Die Erhebung einer permanenten Probe ist kostengünstiger als die Erhebung einer neuen Probe (siehe *Tabelle 1*). Daher kann für Variante b (DSS, permanente Proben) bei gleichen Kosten eine höhere Anzahl Waldproben erhoben werden als bei Variante c, die eine Mindestanzahl von 1000 neuen Waldproben vorsieht. Für die Schätzung von Zustandsvariablen werden nur die in der zweiten Inventur erhobenen Werte herangezogen, ein Update der Werte der ersten Inventur erfolgt nicht. Daher wirkt sich die Anzahl aufgenommener Waldproben direkt auf die Höhe des Standardfehlers aus und

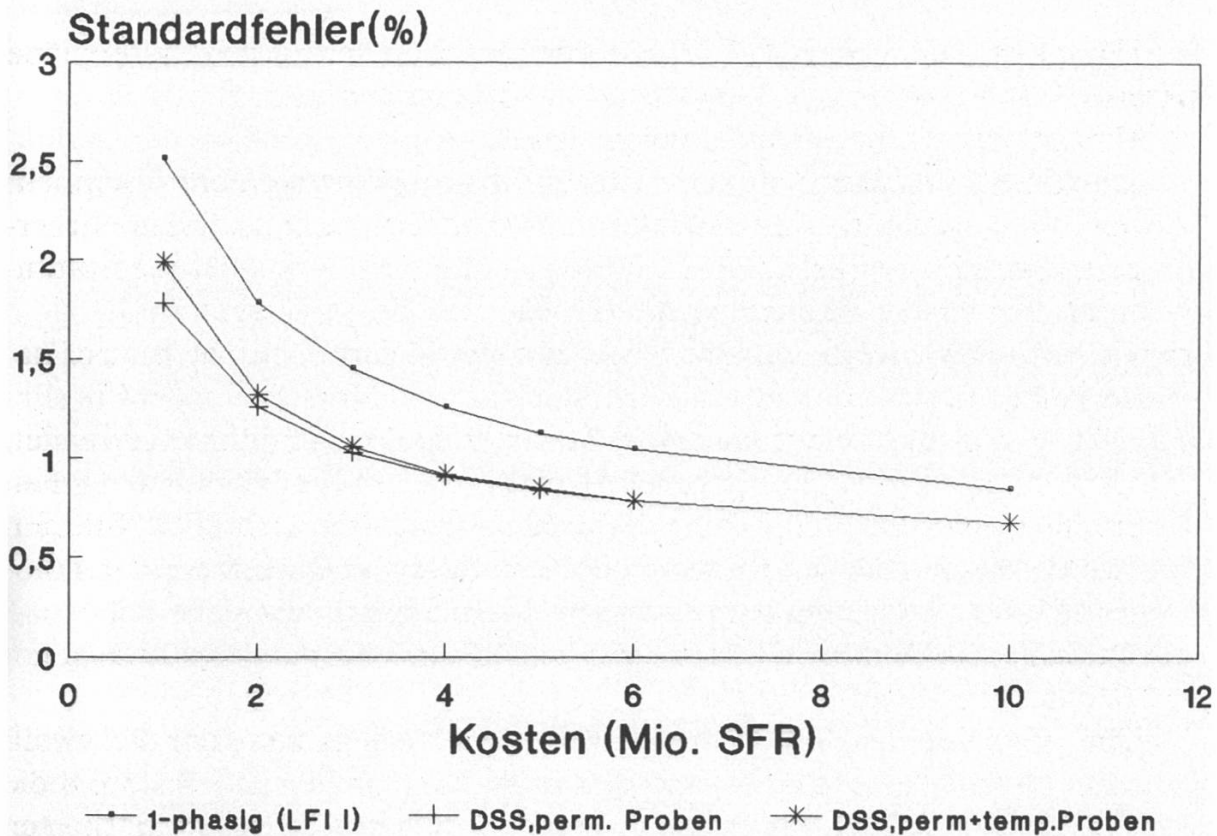


Abbildung 1. Designvarianten für die Zielvariable «Vorrat».

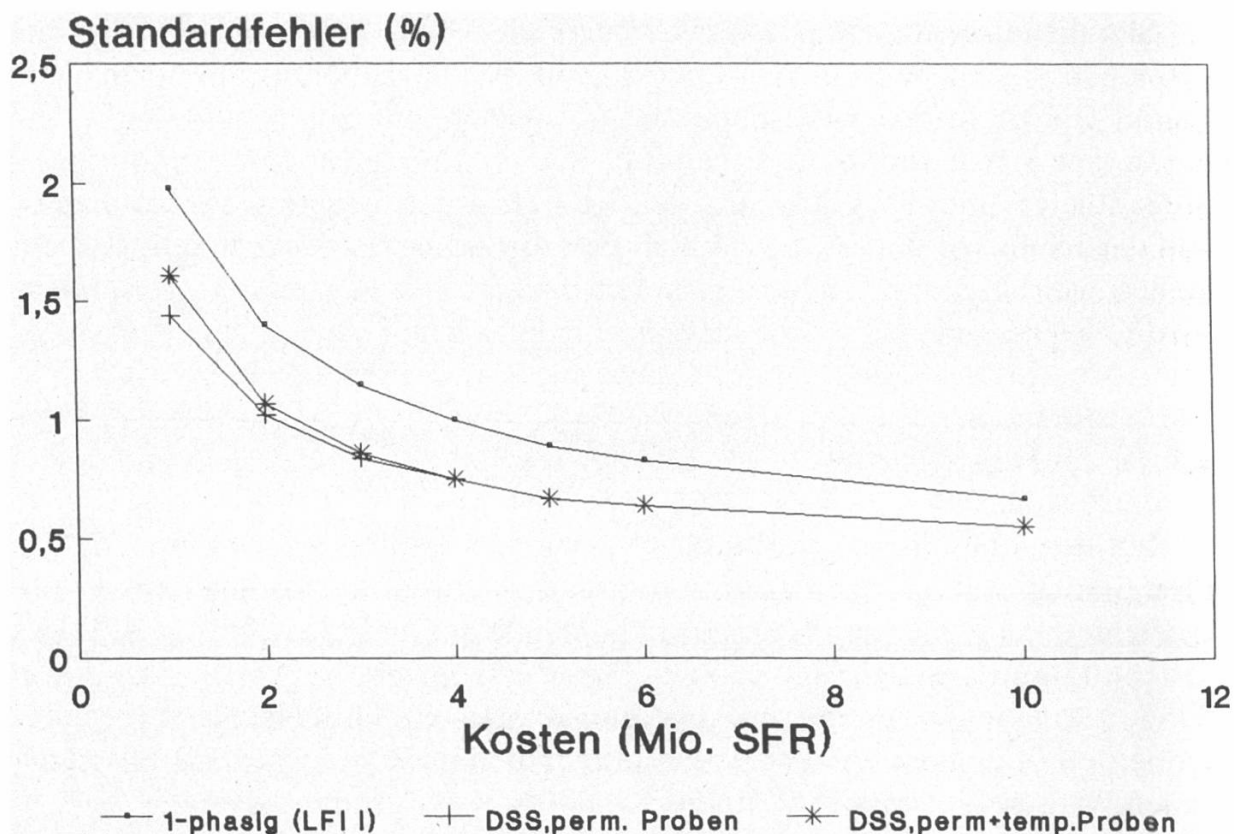


Abbildung 2. Designvarianten für die Zielvariable «Stammzahl».

Variante b ist daher bis zu einem Kostenpunkt von 6 Mio. sFr. kosteneffizienter.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Stichprobenplanung ist aus den *Abbildungen 1* und *2* ersichtlich. Höhere Kosten führen nicht zu einer konstanten Verkleinerung des Standardfehlers. Während bei geringen Kosten eine Erhöhung des Budgets zu einer starken Verringerung des Standardfehlers führt, flacht die Kurve bei steigenden Kosten ab, das heisst Budgeterhöhungen wirken sich weit schwächer auf die Reduktion des Stichprobenfehlers aus. Die für das zweite LFI zur Verfügung stehenden variablen Kosten von 3 Mio. sFr. liegen etwa in dem Bereich, in dem die Kosteneffizienz ein Optimum erreicht. Eine Erhöhung des Budgets hätte einen weit geringeren Einfluss auf den Standardfehler als eine Budgetkürzung. Besonders bei Kosten über sFr. 4 Mio. ist fraglich, ob die finanziellen Ressourcen noch effektiv eingesetzt werden können. Statt einer Erhöhung der Anzahl Waldproben wäre es sicherlich sinnvoller, zusätzlich Merkmale zu erheben, wie beispielsweise Daten zu Vegetation, Boden oder Waldfunktionen.

Der Variantenentscheid für das zweite LFI wurde zugunsten der zweiphasigen Verfahren gefällt. Zusätzlich zu den Erhebungen auf Waldproben werden Luftbildproben zur Schätzung der Stratengrösse interpretiert. Die zweiphasige Variante ohne neue Proben ist für die Schätzung von Zustands-

variablen kosteneffizienter. Der Unterschied in der Kosteneffizienz ist allerdings bei den zur Verfügung stehenden Mitteln sehr gering. Da nicht vollkommen ausgeschlossen werden kann, dass die permanenten LFI-Proben bewusst oder unbewusst durch die Bewirtschaftung beeinflusst werden, ist es notwendig, die Repräsentativität der Resultate durch die Erhebung von neuen Proben zu überprüfen (Köhl, 1990). Daher werden für das zweite LFI trotz einer geringfügigen Verschlechterung der Kosteneffizienz neue terrestrische Proben erhoben.

4.3 Das optimale Design

Im folgenden soll das Design des zweiten LFI näher diskutiert werden. Die Optimierung für die gegebenen Kosten führte zu Erhebungen auf drei verschiedenen Netzen:

- Luftbildinterpretationen in einem 500 x 500 m Netz
- Erhebung permanenter Proben auf einem 1,4 x 1,4 km Netz
- Erhebung neuer Proben auf einer Unterstichprobe des 500 x 500 m Netzes.

Auf dem 500 x 500 m Netz (Phase 1) werden Luftbildproben interpretiert. Für die gesamte Schweiz ergeben sich bei diesem Netz etwa 160 000 Luftbildproben. Auf allen Proben wird gemäss der Walddefinition aus dem ersten LFI (Mahrer, 1976, EAFV, 1988) der Wald-/Nichtwald-Entscheid gefällt. Auf Grund der Resultate aus dem ersten LFI sind etwa 120 000 Proben auf Nichtwaldflächen und 40 000 Waldproben zu erwarten. Auf den Waldproben werden zusätzliche Interpretationen durchgeführt, um die Zugehörigkeit der Probe zu verschiedenen Waldstraten zu bestimmen. Die relativ hohe Dichte dieses Netzes erlaubt eine genaue Waldflächenbestimmung. Diese hohe Genauigkeit reduziert die Schätzfehler von Merkmalen mit Flächenbezug erheblich.

Von den annähernd 11 000 Waldproben des ersten LFI wird nur eine Unterstichprobe auf einem 1,4 x 1,4 km Netz aufgenommen. Dieses Netz wurde so über das 1 x 1 km Netz des ersten LFI und das 4 x 4 km Netz der WSI gelegt, dass alle Proben der WSI, die seit 1985 aufgenommen wurden, auch im zweiten LFI erhoben werden. Das 1,4 x 1,4 km Netz umfasst 5966 Proben, die im ersten LFI im Wald lagen. Davon sind 453 Proben unzugänglich oder Gebüschwaldproben, die terrestrisch nicht aufgenommen werden, so dass 5513 zugängliche, permanente Waldproben auch bei der Folgeinventur erhoben werden.

Um die Repräsentativität des Netzes des ersten LFI zu überprüfen, werden auf einem Unternetz des 500 m Netzes etwa 500 bis 700 neue Proben aufgenommen. Die genaue Anzahl neuer Proben wird erst nach dem Wald-/Nichtwald-Entscheid im Luftbild bekannt sein.

Die Optimierung des Designs wurde nicht nur am Merkmal «Holzvorrat» orientiert. Diese sicherlich sehr wichtige Zielvariable im ersten LFI sollte nicht allein den Ausschlag für die Auswahl der optimalen Variante geben. Daher wurde die Optimallösung auch unter Beachtung anderer Merkmale gesucht, von denen hier neben dem Vorrat die Stammzahl und die Basalfläche sowie deren Veränderungen angeführt werden sollen. In *Abbildung 3* sind die absoluten Standardfehler für die Schätzung von Zustandswerten und Veränderungen für diese drei Merkmale über den Kosten aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass bei Kosten von 3 Mio. sFr. alle Variablen etwa im Bereich der optimalen Kosteneffizienz liegen. Veränderungen werden genauer geschätzt als Zustandsvariablen, da eine enge Korrelation zwischen den Werten der Erstaufnahme und der Folgeerhebung zu erwarten ist.

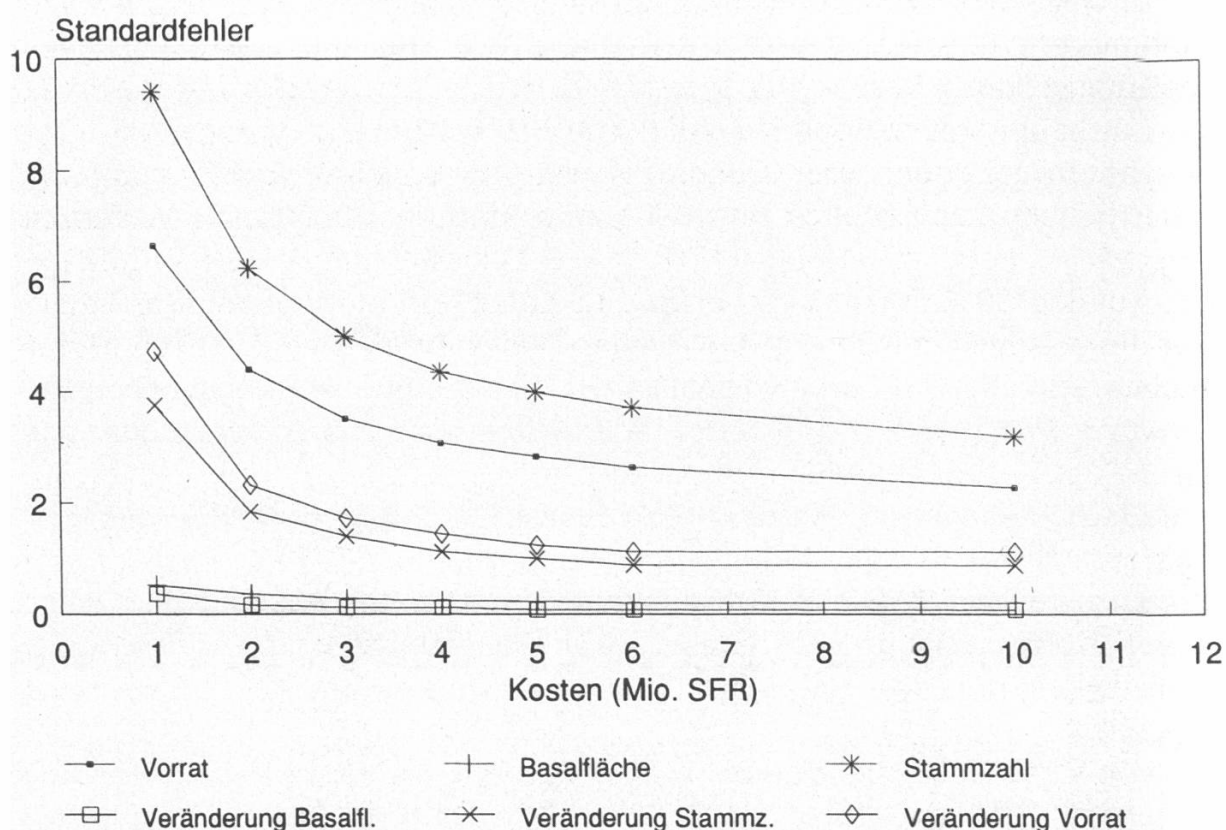


Abbildung 3. Zweiphasiges Stichprobenverfahren zur Stratifizierung mit permanenten und temporären Proben.

Die Schätzung der Basalfläche erfolgt am genauesten. Dies mag unter anderem daran liegen, dass viele Eingriffe in die Bestände an einer konstanten Basalflächenhaltung orientiert sind. Daraus folgt eine vergleichsweise geringe Variation dieses Merkmals, die wiederum zu einer genaueren Schätzung führt.

Die Aussageeinheiten des LFI sind neben der gesamten Schweiz die fünf Produktionsregionen Jura (JU), Mittelland (ML), Voralpen (VA), Alpen (A)

und Alpensüdseite (AS); sie müssen bei der Optimierung des Designs berücksichtigt werden. In *Abbildung 4* sind die zu erwartenden Schätzfehler des optimalen Designs für die Vorratsschätzung getrennt für die Produktionsregionen im Vergleich zu dem im ersten LFI verwendeten einphasigen Verfahren dargestellt. In allen Aussageeinheiten erfolgt eine Reduktion des Standardfehlers, die ausser in der Produktionsregion Alpensüdseite deutlich ausgeprägt ist.

5. Folgerungen

Die Planung des statistischen Konzeptes des zweiten LFI orientierte sich an verschiedenen Leitsätzen. Die Erfahrungen des ersten LFI sollten genutzt werden; die Vergleichbarkeit mit dem ersten LFI musste soweit als möglich gewährleistet sein; Verbesserungen sollten soweit als nötig eingeführt werden, und das gesamte Konzept sollte offen sein für weitere Erhebungen, etwa für Folgeinventuren oder für kantonale Inventuren. Aus einer Anzahl von möglichen Stichprobenvarianten wurde das für das zweite LFI optimale Verfahren ausgewählt, wobei die Kosteneffizienz das Entscheidungskriterium bildete. Das statistische Design des zweiten LFI garantiert bei den zur Verfügung stehenden Kosten die geringsten Standardfehler für eine Vielzahl von Merkmalen.

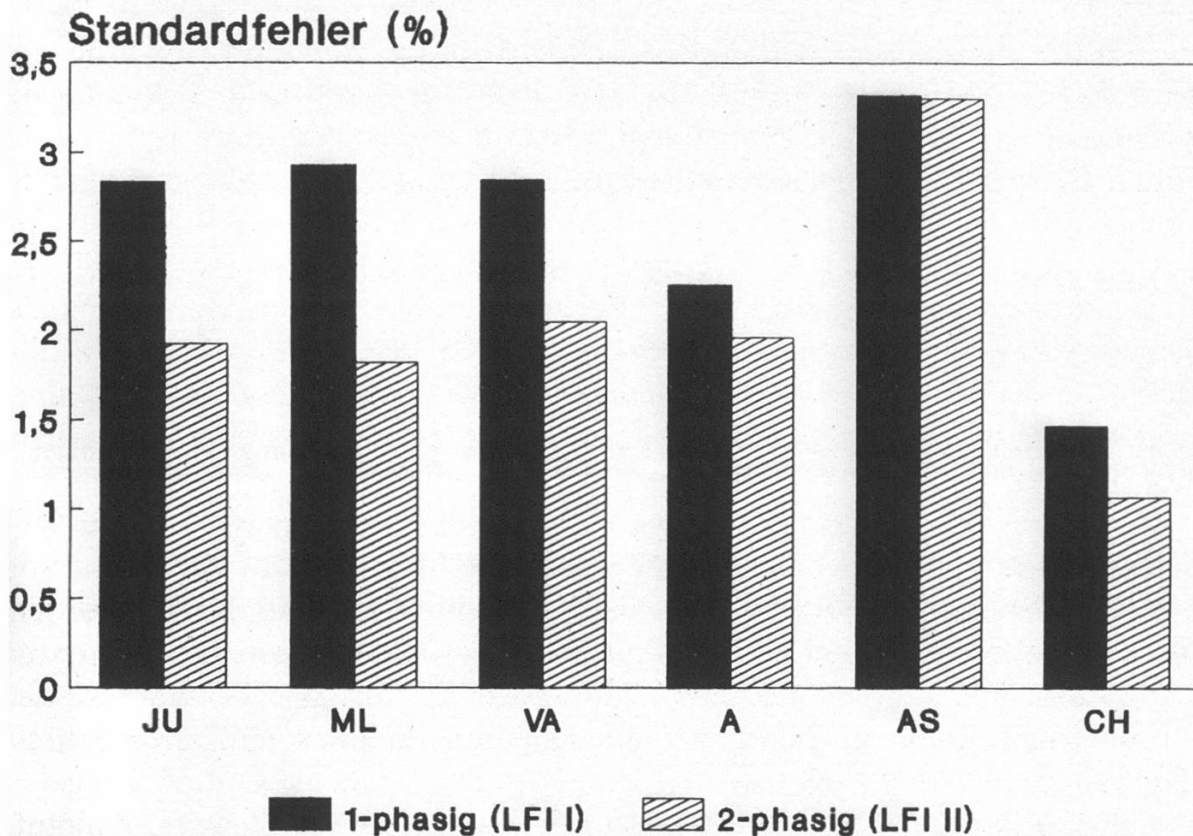


Abbildung 4. Standardfehler für Zielvariable «Vorrat» getrennt nach Produktionsregionen.

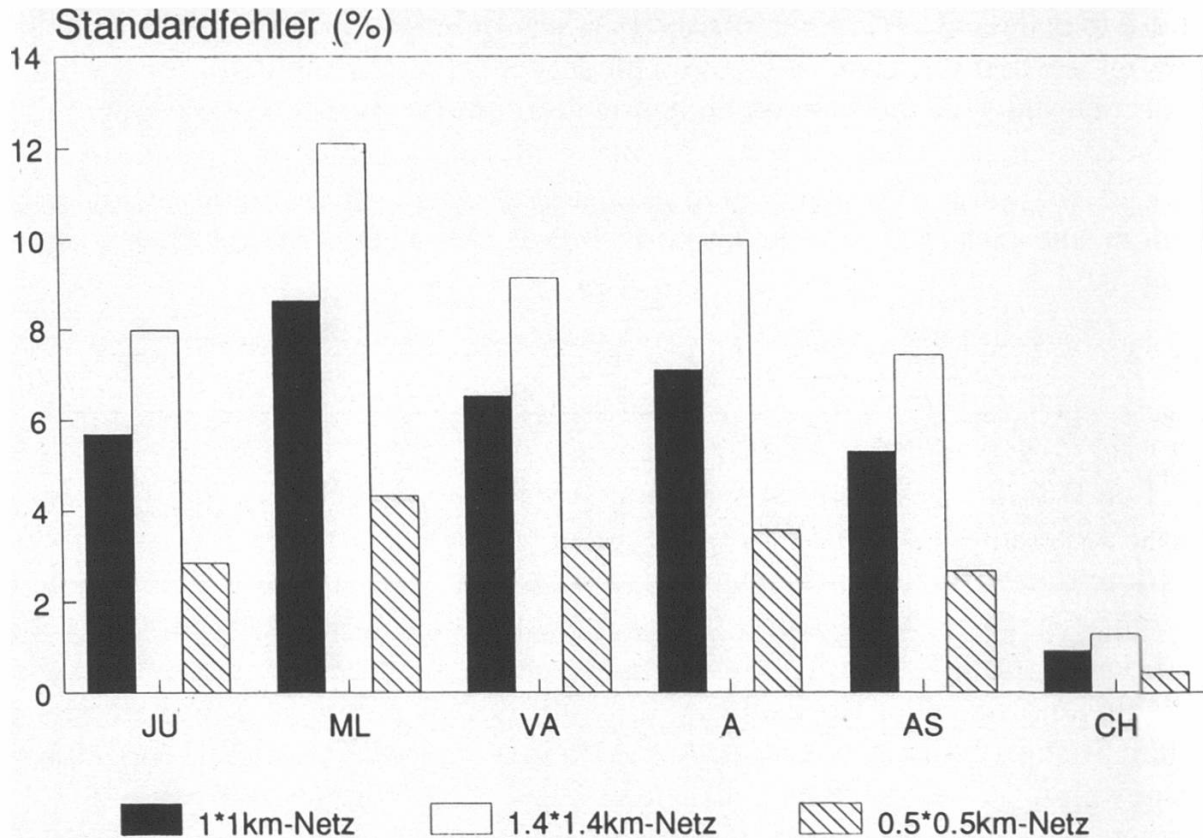


Abbildung 5. Standardfehler für Zielvariable «Waldfläche» getrennt nach Produktionsregionen.

Für die Optimierung des statistischen Designs des zweiten LFI wurde ein allgemeines Verfahren entwickelt, das auch für kantonale Erhebungen anwendbar ist. Ein wichtiges Hilfsmittel kann dieses Verfahren sein, wenn unklar ist, wie sich verschiedene Budgetszenarien auf die Schätzgenauigkeit auswirken.

Die Betrachtung der Kostenkurven zeigt, dass bei einer Steigerung der Gesamtkosten der Fehlerrahmen für die Ergebnisse der Befundeinheit Schweiz nur noch unwesentlich verbessert werden könnte. Zusätzliche Mittel sollten daher besser für weitere Erhebungen verwendet werden wie eine Bodeninventur, eine Vegetationsinventur oder die Erfassung von Merkmalen zur Beschreibung der Waldfunktionen.

Das Budget für das zweite LFI wurde erst relativ spät bekannt: eine zusätzliche Erschwernis bei der Planung des zweiten LFI war die im Vergleich zum ersten LFI starke Mittelreduktion: Real stehen nur etwa 70 % der finanziellen Mittel zur Verfügung. Ohne eine Änderung des statistischen Designs hätte dies zwangsläufig zu einer Situation geführt, in der fast sämtliche Merkmale mit einer geringeren Genauigkeit hätten hergeleitet werden können. Durch die Weiterentwicklung der statistischen Methoden sowie die Optimierung des Designs, insbesondere die intensivere Verwendung des Luftbildes, konnten die Budgetreduktionen weitgehend aufgefangen werden. Für viele Merkmale

ist trotz der geringeren zur Verfügung stehenden Finanzen eine gegenüber dem ersten LFI höhere Genauigkeit zu erwarten.

Verdankung

Wir danken Herrn Hansruedi Stierlin, Leiter der Gruppe Feldaufnahmen, für die Zusammenstellung der Aufnahmekosten für permanente und temporäre Proben, die aufwendige Auswertungen von Turnusrapporten des ersten LFI und der WSI sowie Zeitstudien erforderte.

Herrn Dr. Walter Keller, Leiter der Sektion Vegetationskunde, danken wir für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Herrn Prof. Rodolph Schlaepfer, Direktor der WSL, und Denver Burns, USDA Forest Service, danken wir für die grosszügige Unterstützung dieses Projektes.

Résumé

Deuxième inventaire forestier national suisse: Optimisation du plan d'échantillonnage vue sous l'angle du rapport coût-efficacité

Le premier inventaire forestier national (IFN) a permis d'établir le bilan de l'état de la forêt. Le deuxième IFN permettra en outre de cerner les changements qui se sont produits dans les écosystèmes forestiers. Bien que sa conception statistique soit fondée sur les méthodes du premier IFN, certains points essentiels ont dû être plus largement développés. Face à l'impératif de la réduction des coûts, il a fallu augmenter l'efficacité de ce deuxième inventaire, qui sera davantage axé sur des données recueillies à l'aide de photos aériennes.

Il existe plusieurs concepts d'inventaires répétés. Nous nous bornerons à évoquer les principaux, à savoir l'inventaire de contrôle par échantillons (*Continuous Forest Inventory, CFI*), réalisé sur des placettes permanentes, et les inventaires répétés sur un échantillonnage où une partie des placettes du premier inventaire sont remplacées par d'autres (*Sampling with Partial Replacement, SPR*).

Le choix d'une variante optimale a été dicté par la précision obtenue pour les variables cibles à estimer et par les coûts des relevés. Les facteurs ayant influencé la conception statistique sont entre autres les coûts des relevés terrestres et aériens, les rapports de variances et les unités d'évaluation.

Ce travail présente quelques règles générales applicables à l'optimisation des plans d'échantillonnage. Ces bases sont concrétisées par l'exemple du deuxième inventaire forestier national. Vous y trouverez aussi une analyse des critères sur lesquels repose la conception de ce deuxième inventaire.

Traduction: Monique Dousse

Literatur

- Bickford, C. A., Mayer, C. F., Ware, K. D., 1963: An Efficient Sampling Design for Forest Inventory: The Northeastern Forest Survey, *J For* 61: 826–833.
- Brassel, P., 1991: The second Swiss National Forest Inventory: Retrospect, Aims, Planning, in: Köhl, M., Pelz, D. R. (eds.): Forest Inventories in Europe with Special Reference to Statistical Methods, Proceedings of the International IUFRO S.4.02 and S.6.02 Symposium, May 14–16, 1990, Birmensdorf, Switzerland: 20–26.
- Cochran, W. G., 1977: Sampling Techniques, J. Wiley & Sons, New York, 428 p.
- EAFV, 1988: Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–1986, Eidg. Anst. Forstl. Versuchswes., Ber. 305, 375 S.
- Garfinkel, R. S., Nemhauser, G. L., 1972: Integer Programming, John Wiley & Sons, New York, 427 p.
- Gertner, G., Köhl, M.: An Assessment of Some Nonsampling Errors in a National Survey Using an Error Budget, *Forst Sci.* 38: 525–538.
- Hillier, F. S., Lieberman, G. J., 1974: Operations Research, 2nd ed., Holden-Day Inc., San Francisco, 800 p.
- Köhl, M., 1990: Stichprobenkonzepte für das zweite Schweizer Landesforstinventar, *Schweiz. Z. Forstwes.* 141: 745–755.
- Köhl, M. (im Druck): Statistisches Design für das zweite Schweizer Landesforstinventar: Ein Folgeinventurkonzept unter Verwendung von Luftbildern und terrestrischen Aufnahmen, Mitt. Eidg. Forschungsanst. Wald, Schnee, Landschaft.
- Mahrer, F., 1976: Abgrenzungsnormen zur Erfassung der Waldflächen im Schweizerischen Landesforstinventar (LFI), Eidg. Anst. Forstl. Versuchswes., Bericht Nr. 167: 29–53.
- Patterson, H. D., 1950: Sampling on Successive Occasions with Partial Replacement of Units, *Jour. Royal Statist. Soc., Ser. B*, 12(2): 241–255.
- Schmid, P., 1967: Die Weiterentwicklung der Leistungskontrolle in der Schweiz, *Wiss. Zeitschrift d. techn. Univ. Dresden*, Jg. 16/2.
- Schmid-Haas, P., Werner, J., Baumann, E., 1993: Kontrollstichproben: Aufnahmeinstruktion, 3. Auflage, Eidg. Forschungsanst. Wald, Schnee und Landschaft, Bericht Nr. 186, 143 S.
- Scott, C. T., 1984: A New Look at Sampling with Partial Replacement, *Forest Sci.* 30: 157–166.
- Scott, C. T., Köhl, M., 1993: A Method for Comparing Sampling Design Alternatives for Extensive Inventories, Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, Band 68, Heft 1, 62 p.
- Scott, C. T., Köhl, M., 1994: Sampling with Partial Replacement and Stratification, *Forest Sci.* 40: 30–46.
- Stott, C. B., 1947: Permanent Growth and Monitoring Plots in Half the Time, *Jour. For.*, 37: 669–673.
- Ware, K. D., Cunia, T., 1962: Continuous Forest Inventory with Partial Replacement of Samples, *For. Sci., Monograph* 3, 40 p.
- Wöhe, G., 1981: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Verlag Vahlen, München, 1245 p.

Verfasser:

PD Dr. Michael Köhl und Dr. Peter Brassel, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Sektion Landesforstinventar, CH-8903 Birmensdorf.
Dr. Charles T. Scott, USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Delaware, Ohio, USA.