

Die Linien-Intersekt-Stichprobe: Ein effizientes Verfahren zur Erfassung von liegendem Totholz?

Line Intersect Sampling:

An efficient method for acquisition of coarse woody debris?

Roth, A., Kennel, E., Knoke, Th. und Matthes, U.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird ein Linien-Intersekt-Stichprobenverfahren zur Inventur von liegendem Totholz vorgestellt. Liniestichprobenverfahren bieten sich für die Totholzinventur an, weil sie sich zur Aufnahme von linienförmigen Objekten besser eignen, als flächige Inventurmethode.

Zunächst werden die theoretischen Grundlagen der Linien-Intersekt-Stichprobe, so wie sie beispielsweise in Nordamerika zur Bestimmung von Hiebsresten verwendet wird, beleuchtet. Um auch gerichtete Totholzvorkommen verzerrungsfrei erfassen zu können, wird eine Methode mit Winkelkorrektur für die einzelnen Totholzstücke entwickelt. Diese Methode wird mit Hilfe von Computer-Simulationen auf mögliche Verzerrungen und die Streuung der Stichprobenergebnisse getestet. Die Simulationen werden mit FORTRAN-Programmen realisiert. Auf den Ergebnissen der Simulationen aufbauend wird ein Vorschlag für die Durchführung einer Linien-Intersekt-Stichprobe erarbeitet. Dieser wird schließlich in einem Praxistest überprüft.

Das Inventurverfahren liefert verzerrungsfreie Ergebnisse für ungerichtete, teilweise gerichtete und vollständig gerichtete Totholzvorkommen, ohne dass ein bestimmtes Anordnungsmuster für die Intersektlinien benötigt wird. Um gute Stichprobenresultate zu erzielen, ist das Erreichen einer Mindesttrefferzahl notwendig. Die erreichte Trefferzahl wurde unter anderem vom Winkel bestimmt, mit dem die Stücke bei gerichtetem Totholzvorkommen geschnitten wurden.

Schlagwörter: Waldinventur, Linien-Intersekt-Stichprobe, Liniestichprobe, Winkelkorrektur, Totholzinventur, Inventurmethode, Simulationen, liegendes Totholz.

Abstract

This article presents a line intersect sampling method for volume estimation of coarse woody debris. Line sampling procedures offer themselves for deadwood stocktaking, because they are more suitable for the data collection of linear objects than sampling methods with area-based inventory plots.

Firstly, the theory of the line intersect sampling method, as it is used for example in North America for assessing logging residue, is illustrated. A method with angle adjustment for every intersected piece of deadwood is developed. This method prevents bias due to log orientation. The designed method is tested by computer simulations on bias and precision. The simulations were performed with FORTRAN programs. Based on the results of the simulations a suggestion for the establishment of line intersect sampling is developed. This is examined in a practical test and supplemented by empirical values.

The developed inventory sampling procedure produced unbiased results for undirected, partly oriented and completely oriented deadwood distributions, without demanding a certain pattern for the arrangement of the intersect lines. In order to obtain good results of sample, reaching

of a minimum quantity in hits is essentially necessary. The number of the reached hits was determined among other things by the angle, in which the pieces were cut in oriented dead-wood distributions.

Keywords: Forest inventory, line intersect sampling, line sampling, angle adjustment, dead-wood inventory, coarse woody debris, cwd, inventory method, simulation

1 Einleitung

Die Diskussion um das Totholz im Wirtschaftswald läuft seit einigen Jahren und ist im Konflikt zwischen Waldwirtschaft und Naturschutz zum Zünglein an der Waage geworden (SCHERZINGER 1996). AMMER (1991) zählt das Thema Totholz sogar zu den naturschutzpolitisch wichtigsten Anliegen im Bereich der Forstwirtschaft.

Die hohe Bedeutung des Totholzes für den Naturschutz kann in mancher Hinsicht darauf zurückgeführt werden, dass die Artenvielfalt von Wäldern in hohem Maße von Totholzangebot und -struktur abhängig ist (ALBRECHT 1991, UTSCHICK 1991). In den heimischen Wirtschaftswäldern sind jedoch viele an Alt- und Totholz gebundene Tierarten selten geworden und teilweise in ihrem Bestand gefährdet, da der Anteil überalterter, absterbender und abgestorbener Bäume gegenüber Naturwäldern gering ist (ARBEITSKREIS FORSTLICHE LANDESPFLEGE IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 1984).

Eine systematische Totholzforschung in Europa steht erst am Anfang, so dass bisher nur einige Auswertungsansätze für Naturwaldreservate vorliegen (KÖLBEL 2001). Naturwaldreservate unterscheiden sich allerdings außer in Bezug auf die Fragestellung vor allem durch die Größe der beobachteten Fläche von anderen Schutzgebietstypen. Aus diesem Grund sind die dort gesammelten Erfahrungen nicht ohne weiteres zu verallgemeinern. CIR-Luftbilder sind für die Erfassung von stehendem Totholz gut geeignet. Eine Interpretation liegenden Totholzes ist jedoch stark von Bestockungsgrad, Relief und der Totholzart abhängig. Überschirmung, Beschattung, Überdeckung mit Laub oder Moos und ähnliche Rückstrahlungseigenschaften der Laubstreu beeinträchtigen eine Aufnahme zusätzlich (HOFFMANN 2001). Gesucht wird daher ein terrestrisches Stichprobeninventurverfahren, das auch in Großschutzgebieten kostengünstig durchzuführen ist und zuverlässige Ergebnisse liefert.

Dieser Beitrag greift deshalb die Linien-Intersekt-Stichprobe als terrestrisches Inventurverfahren auf, welches sich zur Erfassung prinzipiell linienförmiger Stichprobenelemente anbietet (DE VRIES 1974). Als wesentliches methodisches Element kommen dabei Simulationen von linienförmigen Stichprobenerhebungen zum Einsatz. Zur Überprüfung der Eignung der Linien-Intersekt-Stichprobe werden die folgenden Fragestellungen untersucht:

- Wie lässt sich die bei gerichteten Stichproben auftretende Verzerrung der Stichprobenresultate vermeiden?
- Von welchen Flächeneigenschaften hängen die Verzerrung und die Streuung der Stichprobenergebnisse ab?
- Wie beeinflusst das Stichprobendesign die Verzerrung und die Streuung der Stichprobenergebnisse?

Der Beitrag ist wie folgt strukturiert: Zunächst wird in die Stichprobentheorie der Linien-Intersekt-Stichprobe eingeführt. Dann wird eine Winkelkorrektur zur Vermeidung von Verzerrungen abgeleitet. An die Erläuterung der Simulationsexperimente schließt sich die Ergebnispräsentation an. Aus diesen Ergebnissen wird dann ein Durchführungsvorschlag für eine Intersektstichprobe abgeleitet, der in der Praxis getestet wurde. Hierbei wurden einige Zeit-

studien durchgeführt. Die Arbeit schließt mit einer kritischen Betrachtung von Durchführbarkeit und Wirtschaftlichkeit des Vorschlags.

2 Stichprobentheoretische Grundlagen und Methodik der Simulation

2.1 Die Linien-Intersekt-Stichprobe

Die Linien-Intersekt-Stichprobe (LIS) ist eine Methode, mit der das flächenbezogene Volumen von Holzstücken mit guter Präzision und geringen Kosten erfasst werden kann (VAN WAGNER 1968). Bei der Intersektstichprobe werden nicht wie bei herkömmlichen, flächigen Aufnahmeverfahren Probeflächen abgesteckt, auf denen Messungen durchgeführt werden, die dann auf die Gesamtfläche hochgerechnet werden. Vielmehr werden Stichprobenlinien ausgelegt und die „Treffer“, also Holzstücke, die von der Linie geschnitten werden, als Stichprobenelemente gewertet.

Im forstlichen Kontext wurde die „Line Intersect Technique“ von WARREN und OLSEN (1964) publiziert. Die beiden Forscher mussten mit geringem Aufwand die Menge marktfähigen Holzes ermitteln, das nach Kahlhieb und Auszug des Papierholzes in neuseeländischen *Pinus Radiata*-Beständen auf der Fläche verblieb.

Mit dem theoretischen Hintergrund der Line Intersect Technique hat sich VAN WAGNER (1968) befasst. Er entwickelte eine theoretisch korrekte Verteilung des Volumens und quantifizierte die Verzerrung bei orientierter und nicht zufällig verteilter Stichprobe. VAN WAGNER (1968) schlug dazu folgendes Näherungsverfahren vor: Die Intersektlinien sollen in drei Himmelsrichtungen orientiert werden, jeweils in einem Winkel von 60 Grad zueinander (z.B. in 60, 120 und 180 Grad gegen Nord). Liegt in jede der drei Richtungen die gleiche Gesamtlänge an Intersektlinien, führt dies zu einer gegenseitigen Aufhebung der Verzerrungen. Der durch teilweise gerichtete Stichproben und die daraus resultierende Verzerrung auftretende Fehler kann so zwischen +4,7% und -9,3% eingeschränkt werden. DE VRIES (1974) erarbeitete eine mehrstufige Stichprobe, die es auch erlaubt, die Verteilung für Unterstichproben zu berechnen.

Modifizierte Verfahren des Line Intersect Sampling eröffnen die vielfältigsten Einsatzgebiete. Die deutsche Bundeswaldinventur schließt eine Wegeinventur mit ein, bei der die Schnittpunkte von Wegen mit der Traktlinie gezählt werden. Die proportionale Abhängigkeit von Gesamtweglänge und der Zahl der Schnittpunkte mit der Taxationslinie erlaubt eine Herleitung der Wegedichte beziehungsweise der Wegelänge (BML 1990). HILDEBRANDT (1975) beschreibt die Ermittlung der Länge linienförmiger Geländeobjekte wie z.B. Verkehrslinien, Wasserläufe, Hecken, Grabensysteme oder unterschiedlichste Randzonen aus Luftbildern. Er weist darauf hin, dass sowohl in der schwedischen Reichswaldtaxation, wie auch in der Österreichischen Forstinventur die Inventarisierung der Waldstraßen mit Hilfe von terrestrischen Linienstichproben durchgeführt wird. Für die Auswertung von Luftbildern empfiehlt er eine sternförmige Radial-Linienschablone, mit der mögliche Verzerrungen verhindert werden können.

Eine detaillierte Beschreibung der Bestimmung der Längen von bewaldeten Streifen in den Great Plains in den Vereinigten Staaten liefert HANSEN (1985). STAHL (1998, 2000) entwickelte eine Kombination von Relaskop-Stichprobe und Linien-Stichprobe. Bei dieser Methode geht man mit einem Spiegelrelaskop entlang der zuvor ausgelegten Intersektlinien. Alle liegenden Holzstücke, die bei einem bestimmten Zählfaktor breiter als die Skala an der Vierserkante sind, zählen als Treffer. Auf diesem Weg kommt es, im Vergleich zum Line-Intersect-Sampling, wo nur die von der Linie geschnittenen Holzstücke gewertet werden, zu einer Erhöhung der Trefferzahl.

2.1.1 Die Methode

Das Line Intersect Sampling beruht auf einer relativ alten Erkenntnis, zu der der Franzose GEORGE LOUIS LECLERC, COMTE DE BUFFON (1707-1788) schon 1777 kam und die als „Buffon's Needle Problem“ bekannt ist (DE VRIES 1986). BUFFON hat sich mit der Wahrscheinlichkeit befasst, mit der eine Nadel, die zufällig auf eine Fläche geworfen wird, auf eine dort gezogene Linie trifft. Dies ist die fundamentale Überlegung, aus der alle für eine Inventur mit der Linien-Intersekt-Stichprobe nötigen Zusammenhänge abgeleitet werden können.

Die Größe der untersuchten Eigenschaft im Untersuchungsgebiet berechnet sich dabei folgendermaßen (vgl. KAISER 1983¹; DE VRIES 1986):

$$\hat{X} = \frac{\pi}{2 \cdot L} \cdot \sum^n \left(\frac{x_i}{l_i} \right) \quad (1)$$

\hat{X} = Auf die Fläche bezogene, geschätzte Größe der untersuchten Eigenschaft, sind L und l in Metern angegeben, hat das Ergebnis die Einheit /m², L = Länge der Intersektlinie, l_i = Länge der Nadel, x_i = Größe der Eigenschaft x des untersuchten Objektes i

Diese Eigenschaft kann beispielsweise die Länge, das Volumen, die Masse oder die Oberfläche eines Körpers sein. Handelt es sich nun bei der untersuchten Eigenschaft x um das Volumen eines zylindrischen Körpers, das mit der Huber'schen Mittenflächenformel berechnet wird, sind folgende Umformungen zulässig:

$$\hat{X} = \frac{\pi}{2 \cdot L} \cdot \sum^n \left(\frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \right) \quad (2)$$

\hat{X} = Auf die Fläche bezogenes, geschätztes Volumen in m³/m², d_i = Durchmesser von Objekt i in m

Gleichung 2 lässt erkennen, dass zur Quantifizierung von zylindrischen Körpern nur deren Durchmesser bestimmt werden müssen. Die Längen gehen indirekt, über die Treffwahrscheinlichkeit in die Berechnung mit ein. Auf eine aufwändige Längenmessung der Totholzstücke kann also in diesem Falle bei einer Inventur verzichtet werden, wenn es als ausreichend genau betrachtet wird, die Lage des Mittendurchmessers zu schätzen. Bei der Erfassung ganzer Bäume, die noch eine aufgefächerte Krone besitzen, kann jedoch der Verzicht auf Längenmessung problematisch sein, da in diesem Fall die Volumenermittlung über den Mittendurchmesser nicht erlaubt ist. Hier wird das Volumen mit Hilfe von BHD, Länge und einer Formzahltablelle hergeleitet.

Die bisherigen Überlegungen treffen nur bei einer zufälligen Verteilung der Nadeln (Totholzstücke) zu. Liegt jedoch eine vollständig orientierte Stichprobe vor, bei der alle Nadeln in einem Winkel α_i ausgerichtet sind, ergibt sich folgende Verzerrung:

$$X_{Bias} = \frac{\pi}{2} \cdot \sin \alpha_i \cdot X \quad (3)$$

X_{Bias} = Verzerrtes Ergebnis, $\sin \alpha_i$ = Winkel zwischen Nadel und Intersektlinie, hierbei ist immer der kleinere der beiden möglichen Winkel gemeint, es kann also maximal ein Winkel von 90 Grad vorkommen

Die prozentuale Verzerrung beträgt dann in Abhängigkeit vom gemessenen Winkel:

¹ KAISER (1983, S. 969) leitet die angegebene, speziell für die forstliche Anwendung geeignete Formel aus einer allgemeineren Beziehung ab, auf die mit Gleichung 7 noch einmal kurz eingegangen wird.

$$B_1 = 50 \cdot (\pi \cdot \sin \alpha_i - 2) \quad (4)$$

B_1 = Verzerrung **in Prozent** des wahren Wertes

2.1.2 Die Linien-Intersekt-Stichprobe mit Winkelkorrektur

Die entscheidende Schwäche der Linien-Intersekt-Stichprobe ist, dass die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Untersuchungsobjekt von der Intersekt-Linie geschnitten wird in hohem Maße vom Winkel zwischen Linie und Objekt bestimmt wird. Dadurch kommt es bei allen gängigen Verfahren zu Verzerrungen des Stichprobenergebnisses, wenn keine zufällige Totholzorientierung vorliegt. VAN WAGNER kann mit seiner Korrekturmethode nur Stichprobenergebnisse bei vollständig gerichteten Grundgesamtheiten korrigieren. Die Methode nach HILDEBRANDT (1975) eignet sich zur Auswertung von Luftbildern, dürfte allerdings als terrestrisches Verfahren in hügeligem Gelände nur schwer realisierbar sein.

Es ist kaum vertretbar, sich für ein Inventurverfahren zu entscheiden, das sich von vorneherein nur für zufällig verteilte Grundgesamtheiten eignet, wie sie in der Natur wahrscheinlich nur in Ausnahmefällen vorkommen. Im Folgenden wird nun eine Inventurmethode vorgestellt, die für ungerichtete, teilweise gerichtete und vollständig gerichtete Grundgesamtheiten verzerrungsfreie Ergebnisse liefert und dabei immer ergonomisch vorteilhaftes hangparalleles Arbeiten ermöglicht. Dies wird durch eine differenzierte Korrektur der Verzerrung am einzelnen Totholzstück erreicht.

Dazu wird die Formel für die Korrektur von vollständig gerichteten Stichproben nach DE VRIES (1986) so abgewandelt, dass für jedes getroffene Holzstück - abhängig vom Winkel, in dem es von der Intersekt-Linie geschnitten wird - die Verzerrung berechnet werden kann. Auf diesem Wege kann für jedes einzelne Stück das Volumen unverzerrt berechnet werden, das es in der Gesamtfläche repräsentiert.

Dazu wird von folgender Beziehung ausgegangen:

$$X_{Bias} = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\sum^N \left(\frac{x_i \cdot \sin \alpha_i}{A} \right) \right) \quad (5)$$

A = Gesamtfläche, N = Größe der Grundgesamtheit

Daraus lässt sich ableiten:

$$B_{xi} = 50 \cdot (\pi \cdot \sin \alpha_i - 2) \quad (6)$$

Somit erhält man eine Möglichkeit, die Verzerrung nicht nur für komplette Stichproben sondern auch für einzelne Totholzstücke zu berechnen.

Da B_{xi} die Verzerrung in Prozent des wahren Wertes ist, kann man jedes verzerrte Ergebnis in ein unverzerrtes umwandeln, indem man es durch $100 + (50 \cdot (\pi \cdot \sin \alpha_i - 2))$ dividiert und anschließend mit 100 multipliziert.

Aus den Gleichungen 1 und 6 lässt sich für jeden Wert die Verzerrung berechnen und berichtigen. Auf diesem Wege erhält man eine Gleichung, die ein unverzerrtes Ergebnis liefert, unabhängig von der Ausrichtung der einzelnen Bestandteile der Stichprobe.

$$\hat{X} = \sum^n \left[\left(\frac{\frac{\pi \cdot x_i}{2 \cdot L \cdot l_i} \cdot 10000}{100 + (50 \cdot (\pi \cdot \sin \alpha_i - 2))} \right) \cdot 100 \right] = \frac{1}{L} \cdot \sum^n \left[\frac{x_i}{l_i \cdot \sin \alpha_i} \right] = \frac{1}{A} \cdot \sum^n \frac{x_i}{p_i} \quad (7)$$

p_i = von der Ausrichtung zur Intersekt-Linie abhängende Wahrscheinlichkeit, mit der ein Objekt getroffen wird (Auswahlwahrscheinlichkeit), A = Fläche der Aufnahmeeinheit

Mit dem mittleren Teil der Formel 7 wird deutlich, dass die um die Verzerrung korrigierte Formel aus der Beziehung 1 direkt hervorgeht, indem der in Formel 1 verwendete Erwartungswert der Auswahlwahrscheinlichkeit $E(\sin(\alpha_i))=2/\pi$ bei zufälliger oder gleichverteilter Ausrichtung der Totholzstücke durch die konkreten Einzelwerte für $\sin(\alpha_i)$ ersetzt wird².

Aus der Vereinfachung von Formel 7 geht ein genereller Schätzer hervor, der auch von KAISER (1983) abgeleitet und von ihm als Ausgangspunkt für weitere Überlegungen verwendet wird. Durch die vorgenommene Vereinfachung wird deutlich, dass \hat{X} unverzerrt ist, da \hat{X} ein HORVITZ-THOMPSON-Schätzer für X/A ist (DE VRIES 1986, S. 238). DE VRIES zeigt dies generell für Stichproben, bei denen die Stichprobenelemente mit einer zu ihrer Größe proportionalen Wahrscheinlichkeit ausgewählt werden (PPS-Stichproben).

Die Gleichung 7 trifft allgemein für jede zu untersuchende Eigenschaft x zu. Definiert man nun x als das Volumen eines zylindrischen Körpers, erhält man durch eine Umformung aus Gleichung 1:

$$\hat{X} = \sum^n \left(\frac{\pi^2 \cdot d_i^2}{8 \cdot L} \right) \quad (8)$$

Analog dem Schritt, der zu Gleichung 7 führte, kann man nun die Gleichungen 6 und 8 zusammenführen. Auf diesem Wege erhält man mit folgender, im Weiteren verwendeten Gleichung ein unverzerrtes Ergebnis des auf der Fläche vorhandenen Totholzvolumens, unabhängig von der Ausrichtung der einzelnen Bestandteile der Stichprobe.

$$\hat{X} = \sum^n \left[\left(\frac{\frac{\pi^2 \cdot d_i^2}{8 \cdot L} \cdot 10000}{100 + (50 \cdot (\pi \cdot \sin \alpha_i - 2))} \right) \cdot 100 \right] = \frac{1}{L} \cdot \sum^n \left[\frac{\frac{\pi}{4} \cdot d_i^2}{\sin \alpha_i} \right] = \frac{\pi}{4 \cdot L} \sum^n \left[\frac{d_i^2}{\sin \alpha_i} \right] \quad (9)$$

2.1.3 Beurteilung der Verzerrung und der Streuung der Stichprobenergebnisse

Eine mögliche Verzerrung kann durch den Vergleich des tatsächlichen auf der Fläche vorhandenen Totholzvorrats mit dem Mittelwert der Simulationsergebnisse erkannt werden. Als Maß für die Verzerrung wird also die durchschnittliche Abweichung der Stichprobenergebnisse der 50 simulierten Stichproben vom wahren Totholzvolumen analysiert. Der Standardfehler der Simulationsreihen wird zur Berechnung von t-Werten verwendet, um einen approximativen t-Test durchzuführen. Mit Hilfe dieses Tests soll abgeschätzt werden, ob die durchschnittliche Abweichung der Simulationsläufe vom wahren Wert wesentlich ist.

Die Streuung der Stichprobenergebnisse wird mit Hilfe der Standardabweichung beschrieben, die nach folgender Formel berechnet wurde:

² Den beiden anonymen Gutachter sei für die sehr wertvollen Bemerkungen zur Interpretation und Modifikation der Formeln 7 und 9 und für die diesbezüglichen Literaturhinweise herzlich gedankt.

$$s_{\hat{X}} = \sqrt{\frac{\sum^n (\hat{X}_z - \bar{\hat{X}})^2}{n-1}} \quad (10)$$

\hat{X}_z = Stichprobenergebnis des Simulationslaufes z, $\bar{\hat{X}}$ = arithmetischer Mittelwert aller 50 Simulationsläufe, n = Anzahl der Simulationsläufe (50)

2.2 Simulationsprogramme

Die Intersektstichprobe wurde mit Hilfe von Computer-Simulationen getestet. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, weil es nur so möglich ist, zu überprüfen, ob der Zustand der Grundgesamtheit durch die Stichprobe verzerrungsfrei wiedergegeben wird. Denn hierzu muss die Grundgesamtheit bekannt sein. Bei Feldaufnahmen ist das nur dann der Fall, wenn zuvor eine Vollaufnahme durchgeführt wurde. Simuliert man allerdings die Stichprobe für eine zuvor generierte Fläche, ist ein direkter Vergleich von Stichprobenergebnis und Grundgesamtheit möglich.

Die Simulationen wurden mit Hilfe von FORTRAN-Programmen (KENNEL 2002) durchgeführt, da auf Programmiererfahrung in FORTRAN zurückgegriffen werden konnte. Die Simulationen wurden in zwei Stufen unterteilt: Zunächst wurde eine virtuelle Totholzfläche nach den Vorstellungen des Benutzers erzeugt. Diese Probefläche bildete die Grundlage für die Simulation der Linientaxation in einem zweiten Schritt. Die Längen, Durchmesser und Winkel wurden als normalverteilt angesehen. Die Positionen der Totholzstücke wurden mit einem Zufallsgenerator berechnet. Als Eingangsdaten waren folgende Größen erforderlich: [1] Seitenlänge der Fläche (in m), [2] Anzahl der Totholzstücke, [3] Mittelwert und Standardabweichung von: [3a] Länge (in m), [3b] Durchmesser (in cm), [3c] Winkel gegen Nord (in Grad). Als Ausgangsgröße wurden der Totholzvorrat gesamt, der Totholzvorrat pro Hektar und eine Datei geliefert, in der jedes einzelne Totholzstück mit seinen Koordinaten und sonstigen Eigenschaften aufgeführt ist.

Ein zweites Programm griff dann auf die zuvor erzeugten Dateien der Probeflächen zu und führte eine Stichprobe durch. Dazu wurden am linken Rand der Probefläche beginnend Linien erzeugt, die in frei wählbarem Abstand und Winkel gegen Nord parallel zueinander verlaufen. Der Anfangspunkt der ersten Linie wurde von einem Zufallsgenerator berechnet. Die weiteren Linien begannen im vorher bestimmten Abstand zueinander. Die Anzahl der Wiederholungen konnte variiert werden. Durch die jeweils zufällige Wahl des Ausgangspunktes der ersten Linie entstand so eine Serie von zufälligen Stichproben auf immer derselben Fläche, mit einer bekannten Grundgesamtheit. Diese Tatsache ermöglichte es, Erkenntnisse über Mittelwert und Standardabweichung einer Serie von Stichproben zu gewinnen. Nach Berechnung von Lage und Gesamtlänge der Linien wurde überprüft, welche der auf der Fläche ausgelegten Totholzstücke von den Intersekt-Linien geschnitten wurden. Solche getroffene Holzstücke gingen dann in Gleichung 9 zur Berechnung des Volumens ein.

Wurden nun die Eingabeparameter variiert, konnten mit Hilfe dieser wiederholten Stichproben die Verzerrung und die Streuung der Intersektstichproben-Resultate quantifiziert werden. Die Simulationsreihen wurden dabei folgendermaßen gegliedert:

- Stichprobendesign: Variation der Linienlänge, der Flächengröße und des Winkels der Stichprobenlinie. Unter Stichprobendesign werden damit solche Parameter verstanden, die auch in der Praxis für den Durchführenden variierbar sind.

- Flächenmerkmale: Variation der Längen, der Durchmesser, der Winkel der Totholzstücke, der Stückzahl und der Gesamtmasse auf der Fläche. Flächenmerkmale sind in diesem Zusammenhang die Gegebenheiten der aufzunehmenden Fläche, die durch den Inventurtrupp nicht zu beeinflussen sind.

3 Ergebnisse

3.1 Simulationen

Mit Hilfe der Simulationsprogramme konnten in kurzer Zeit große Datenmengen erzeugt werden. Im Folgenden werden exemplarisch nur die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt. Sämtliche Simulationsergebnisse sind bei ROTH (2003) nachzulesen. Hier wurde immer mit einer Anzahl von 50 Wiederholungen gearbeitet.

3.1.1 Einfluss des Stichprobendesigns

Zunächst wird der Einfluss der Linienlänge untersucht, wobei die Taxationslinien immer in einem Winkel von 90 Grad gegen Nord ausgelegt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine größere Linienlänge aufgrund höherer Trefferzahlen zu einer größeren Genauigkeit führt, d.h. zu einer geringeren Streuung des Stichprobenergebnisses (Abb. 1). Auch bei kurzen Linien kommt es zu keiner wesentlichen Verzerrung des Ergebnisses. Die maximale durchschnittliche Abweichung vom wahren Wert betrug 0,25 Fm/ha. Bezogen auf den wahren Totholzvorrat (5,03 Fm/ha) sind dies nur knapp 5 %. Die Streuung der Ergebnisse steigt aber von rund $\pm 0,25$ bis auf etwa $\pm 2,25$ an, so dass bei kurzen Linien die Unsicherheit der Totholzschätzung deutlich zunimmt.

[Abb. 1]

Die Flächengröße hat keinen direkten Einfluss auf die Güte des Ergebnisses. Es macht keinen Unterschied, ob die gleiche Gesamtlinielänge auf einer kleinen oder einer großen Fläche ausgelegt wird. Es bleibt aber zu bedenken, dass die Linienlänge pro Flächeneinheit ausreichend lang sein muss, um alle Flächenteile ausreichend zu repräsentieren.

Mit den unter Abschnitt 2.1.2 abgeleiteten Korrekturformeln soll eine verzerrende Wirkung unterschiedlicher Winkel der Totholzstücke auf das Ergebnis verhindert werden. Theoretisch scheint dieses Problem mit der Winkelkorrektur für einzelne Totholzstücke gelöst. Durch Variation des Winkels der Stichprobenlinie wird nun untersucht, ob die Grundgesamtheit tatsächlich unverzerrt wiedergegeben wird.

In den Tabellen 1 und 2 sind die Stichprobenergebnisse zusammengefasst und mit den Resultaten unkorrigierter Stichprobensimulationen verglichen. Die Simulationen der Intersektstichproben wurden in zwei verschiedenen Versionen durchgeführt. Die Probefläche ist in beiden Fällen 16 Hektar groß. Darauf liegen jeweils 200 Totholzstücke mit einer durchschnittlichen Länge von 10 (± 7) m und einem mittleren Durchmesser von 17 (± 12) cm. Auf den Probeflächen wurden bei jedem Simulationslauf rund 4000 m an Taxationslinie (also 250 lfm/ha) ausgelegt.

Beim ersten Durchlauf sind die Totholzstücke in einem Winkel von 105 Grad gegen Norden (Standardabweichung 70) angeordnet. Beim zweiten Durchlauf liegt eine vollständig gerichtete Verteilung in 105 Grad vor.

[Tab. 1 und Tab. 2]

Werden die Stichprobenergebnisse anhand der winkelabhängigen Auswahlwahrscheinlichkeit der einzelnen Totholzstücke korrigiert, ergeben sich mittlere Abweichungen vom wahren

Wert (der 3,75 Fm/ha beträgt) zwischen $-0,14$ ($-3,7\%$) und $+0,34$ ($+9,1\%$). Wird die beobachtete mittlere Abweichung mit Hilfe des Standardfehlers normiert (standardisiert), so kann basierend auf der Standardnormalverteilung ein approximativer t-Test vorgenommen werden. Dazu müssen die standardisierten Abweichungen mit einem Schwellenwert in Höhe von 1,96 (Irrtumswahrscheinlichkeit 0,05) verglichen werden. Überschreiten die standardisierten Abweichungen den Schwellenwert, muss davon ausgegangen werden, dass die mittlere Abweichung (Verzerrung) wesentlich (signifikant) ist.

Signifikante Verzerrungen können aber in keinem Falle erkannt werden, wenn die Totholzschätzungen einzelstammweise korrigiert wurden. Unterbleibt die Korrektur, so schwanken die mittleren Abweichungen der Stichproben vom wahren Wert zwischen $-0,35$ und $+0,11$ und in zwei Fällen (in Tab. 1 grau hinterlegt) treten signifikante Verzerrungen auf. Allerdings scheint eine Vernachlässigung der Korrektur der Stichprobenergebnisse bei großer Streuung der Winkel der Totholzstücke (die Standardabweichung betrug ± 70 Grad) keine gravierende Verzerrung zur Folge zu haben, denn die resultierenden Abweichungen erscheinen auch dann tolerierbar.

Bei vollständig gerichteter Verteilung der Totholzstücke (Tab. 2) ändert sich das Bild jedoch drastisch. Während im Falle der korrigierten Stichprobe selbst bei annähernd parallel zu den Totholzstücken ausgelegten Taxationslinien (Winkel 90 bzw. 110 Grad) keine Verzerrungen auftreten (obwohl hier nur 12 bzw. 4 Treffer erzielt wurden) können die Ergebnisse ohne winkelabhängige Korrektur nicht mehr akzeptiert werden. Die durchschnittlichen Abweichungen liegen zwischen $-3,32$ (-89%) und $+2,02$ Fm/ha ($+54\%$) und nahezu alle Verzerrungen sind auch signifikant.

Bei steiler werdenden Winkeln ist auch bei Korrektur der Stichprobenergebnisse eine sinkende Genauigkeit (also eine größer werdende Streuung) deutlich erkennbar (Tab. 2). Die Standardabweichung steigt von $\pm 0,65$ bis auf $\pm 2,64$ an. Dieser Befund ist allerdings nur mittelbar durch den Winkel bedingt. Er kann direkt auf die geringe Zahl von Treffern zurückgeführt werden, die bei spitzen Schnittwinkeln zwischen Taxationslinie und Totholzstücken resultiert. Um dies zu verdeutlichen, wurde eine Simulation mit einer Ausrichtung der Taxationslinie von 90 Grad gegen Norden (also fast parallel zu den Totholzstücken) und einer Länge von 16000 m, statt der vorher ausgelegten 4000 m Intersektlinie durchgeführt. Dadurch ergibt sich eine höhere Trefferzahl (32 anstatt 12) und - mit einer Standardabweichung von $\pm 0,81$ - auch eine größere Genauigkeit. Dies verdeutlicht, dass bei teilweise oder vollständig gerichteten Totholzverteilungen mit Hilfe einer durchdachten Linienführung eine höhere Trefferzahl und damit ein besseres Stichprobenergebnis erzielt werden kann.

Vergleicht man die Ergebnisse dieser Simulation mit denen bei kürzerer Taxationslinie aber stumpfen Schnittwinkeln, die ebenfalls im Mittel rund 30 Treffer erzeugt haben (dies war z.B. bei einem Winkel der Taxationslinie von 70 Grad gegen Nord der Fall), wird deutlich, dass auch hier die Trefferzahl die entscheidende Einflussgröße für die Genauigkeit der Stichprobe darstellt.

3.1.2 Einfluss der Flächenmerkmale

Die Qualität der Stichprobenergebnisse änderte sich nicht, wenn wenig lange oder viele kurze Totholzstücke auf der Probefläche verteilt waren. Allerdings neigt das Verfahren zu einer Unterschätzung des Totholzvolumens, wenn alle Totholzstücke kürzer als zwei Meter sind. Unterschiedliche Längenstreuungen haben keinen merklichen Einfluss auf die Stichprobenergebnisse.

Weder bei der absoluten Durchmessergröße noch bei deren Streuung war eine Veränderung der Ergebnisqualität zu erkennen.

Der Einfluss der Streuung der Winkel, in dem die Totholzstücke auf der Fläche ausgerichtet sind ist gering. Völlig gerichtete Totholzvorkommen bewirken aber tendenziell eine geringe Verbesserung der Ergebnisse, wenn der Winkel in dem Totholzstücke und Taxationslinie sich schneiden nicht zu klein ist. Gering oder weit streuende Winkelverteilungen unterscheiden sich in ihren Ergebnissen nicht.

Das vorhandene Totholzvolumen beeinflusst die Stichprobenergebnisse über die Trefferzahl. Bei größerem Totholzvolumen werden mehr Treffer erzielt und die Güte der Ergebnisse steigt. Die Trefferzahl erweist sich allgemein als die entscheidende Einflussgröße für die Ergebnisqualität.

3.1.3 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

- Die Trefferzahl ist die entscheidende Größe für die Genauigkeit der Stichprobe.
- Die freie Wahl der Winkel der Intersektlinie führt zu keiner Verzerrung des Ergebnisses.
- Das auf der Probefläche vorhandene Totholzvolumen bestimmt das Verhältnis von Linienlänge zu Trefferzahl. Mehr Totholz führt bei gleicher Linienlänge zu mehr Treffern. Wird also ein großes Totholzvolumen erwartet, kann man mit kürzerer Linienlänge planen.
- Durch Veränderung des Winkels der Intersektlinie kann unter Umständen die Trefferzahl und damit die Präzision der Stichprobe erhöht werden. Dabei sind stumpfere Schnittwinkel vorteilhaft.
- Werden mehrere Intersektlinien ausgelegt, ist es gleichgültig welchen Winkel sie zueinander haben. Entscheidend ist allerdings, dass sie gerade sind, da nur dann die Wahrscheinlichkeit unverzerrt wiedergegeben wird. Die Winkel zwischen Linie und Totholzstück müssen möglichst genau gemessen werden.
- Die Linienlänge wird durch die Gegebenheiten auf der Probefläche begrenzt. Sie sollte nur so lang sein, wie gewährleistet ist, dass sie völlig gerade bleibt.
- Es sollte mit genügend langen Linien gearbeitet werden, da ansonsten die Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet nicht ausreichend widerspiegelt werden. MCRAE et al. (1979) geben als mindestens notwendige Stichprobendichte ein gleichseitiges Dreieck mit einer Seitenlänge von 30 m pro 20 ha Untersuchungsgebiet an, wenn mit dem Verfahren nach VAN WAGNER gearbeitet wird. Die dargestellte Simulationstechnik kann in Verbindung mit den im Folgenden präsentierten Zeitstudien zur Optimierung des Stichprobendesigns verwendet werden.
- Das Stichprobenergebnis muss eine gewisse Mindesttrefferzahl überschreiten, wenn es nicht zu starken Streuungen unterliegen soll. Die untersuchte Fläche sollte deshalb

nicht allzu klein sein, da ansonsten der Aufnahmearbeit pro Flächeneinheit zu groß wird. Da empirisch abgesicherte Zahlen fehlen und die Simulationsergebnisse nicht ohne weiteres auf die Praxis zu übertragen sind, kann kein exakter Wert für eine minimale Stichprobengröße angegeben werden. Es erscheint allerdings vertretbar, Trefferzahlen zwischen 50 und 150 als Stichprobenmindestgröße anzustreben.

3.2 Praxistest

Mit Hilfe eines Praxistests soll nun untersucht werden, ob das bis zu diesem Zeitpunkt rein theoretisch geprüfte Verfahren erfolgreich in der Praxis umgesetzt werden kann. Dabei soll das Augenmerk vorwiegend auf der Beantwortung folgender Fragen liegen:

- Welche Hilfsmittel und welche Aufnahmemethode liefern in Bezug auf Zeitaufwand und Genauigkeit die besten Ergebnisse?
- Werden auch in der Realität gute Stichprobenergebnisse erzielt?
- Wie groß ist der tatsächliche Zeitbedarf für die Durchführung einer Intersektstichprobe?

Für den Praxistest wurden die Naturwaldreservate Pfaffenberg und Wüsttal im Bereich der rheinland-pfälzischen Forstämter Hinterweidenthal und Merzalben ausgewählt.

3.2.1 Methodische Vorüberlegungen

Um in der Praxis auf die Erkenntnisse BUFFONS aufbauen zu können, muss man zunächst in jedem dreidimensionalen Objekt eine Nadel definieren. Bei der Aufnahme muss ganz präzise darauf geachtet werden, dass man nur die Totholzstücke als Treffer wertet, bei denen auch die zuvor definierte Nadel geschnitten wird, denn die geometrisch hergeleitete Wahrscheinlichkeit für Schnitt von Linie und Nadel trifft nur dann zu.

Hierin liegt auch gleich ein psychologischer Nachteil dieses Verfahrens, da die Intersektlinie das Objekt als solches schneiden kann, es aber nur dann als Treffer gewertet wird, wenn auch die Nadel geschnitten wird. Es wäre fatal, alle von der Linie berührten Totholzstücke als Treffer zu werten.

Das zweite, nicht zu vernachlässigende Detail bei einer korrekten und konsequenten Durchführung ist, dass die Nadellänge parallel zur Geländeoberfläche gemessen werden muss. Liegt ein toter Baum zum Beispiel nicht auf dem Boden, sondern angelehnt an einen anderen Baum, so spielt für die Wahrscheinlichkeit, mit der er als Treffer in die Stichprobe eingeht, nur seine auf die Geländeoberfläche projizierte Ausdehnung eine Rolle. In dieser Projektion gilt es, die Nadel zu definieren.

Die Länge der Nadel wird verwendet, um die Trefferwahrscheinlichkeit zu berücksichtigen. Die Länge der Horizontalprojektion des Objektes erhält man aus der realen Länge durch Multiplikation mit dem Kosinus des Winkels zur Oberfläche. Die zweite, reale Länge des getroffenen Objektes dient der Ermittlung des Volumens.

Folglich ist es unumgänglich, bei Objekten, die nicht parallel zur Geländeoberfläche liegen, mit zwei verschiedenen Längen zu rechnen, um systematische Fehler zu vermeiden.

Werden bei den Aufnahmen zylindrische Körper erfasst, brauchen lediglich Linienlänge sowie Durchmesser und Winkel der Totholzstücke gemessen zu werden. Wenn das Volumen aber nicht mit Hilfe der Huber'schen Mittenflächenformel berechnet wird, ist auch eine Längenmessung nötig.

Die Linien sollten am besten in einem Muster ausgelegt werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Linienlage nicht subjektiv beeinflusst wird. Andernfalls wäre es möglich, dass der Inventurtrupp unbewusst die Trefferzahl erhöht oder erniedrigt.

Die Linien sollten relativ homogen über die Probefläche verteilt sein, damit alle Bestandesteile annähernd gleich gut repräsentiert werden.

3.2.2 Aufnahmemethodik

Bei der Durchführung der Intersekt-Stichprobe konnte nicht auf Erfahrungsberichte vorangegangener Inventuren zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund musste zunächst eine Methode gefunden werden, die es ermöglicht, die Stichprobenlinien ausreichend genau und doch möglichst schnell auszulegen.

Bewährt hat sich dabei ein Vorgehen im Drei-Mann-Trupp. Das Einmessen der Intersekt-Linie erfolgt mit einem MERIDIAN-Wyssen-Universal-Kompass. Zwei Personen gehen voraus und messen die Linie unter Zuhilfenahme von Fluchtstäben ein. Derjenige, der die Fluchtstäbe trägt, wird von einer zweiten Person, die ein Fadenmessgerät und einen MERIDIAN-Wyssen-Universal-Kompass mit sich führt, eingewiesen. Das dritte Truppmitglied geht hinterher, vermisst die getroffenen Totholzstücke und trägt die Daten in ein Formblatt zur Außenaufnahme ein.

Der MERIDIAN-Wyssen-Universal-Kompass wird vorwiegend für Arbeiten im Gebirge eingesetzt. Er wird einfach an einem Fluchtstab eingehängt und ist dadurch schnell aufgebaut. Durch einen Visierschlitz und gegenüberliegenden Visierstrich erlaubt er sehr steile Visuren und ein genaues Messen. Eine Prismenlupe ermöglicht zusätzlich eine gleichzeitige Kompassablesung. Das Fadenmessgerät hat sich im Praxistest besonders bewährt, da es in einem Arbeitsschritt die Bestimmung der Linienlänge und die eindeutige Definition der Linienführung ermöglicht, die zur Entscheidung Treffer oder nicht Treffer ausschlaggebend ist.

Es sollte darauf geachtet werden, dass die Intersekt-Linien hangparallel gelegt werden, da dies den Arbeitsablauf stark vereinfacht. Trotzdem müssen zum Teil beachtliche Höhenunterschiede überwunden werden. Dabei ist dann ein freies Schwingen des Kompasses bei schräger Visur sehr hilfreich, welches der MERIDIAN-Wyssen-Universal-Kompass ermöglicht.

Die Abstände zwischen den Fluchtstäben sollten möglichst groß gewählt werden, sind aber durch die Sichtentfernung und das Gefälle begrenzt.

3.2.3 Aufnahmeergebnisse

Um die Qualität der Stichprobenergebnisse wirklich beurteilen zu können, muss das reale Totholzvorkommen auf den untersuchten Flächen aus vorangegangenen Vollaufnahmen bekannt sein. Bei der Intersekt-Stichprobe handelt es sich jedoch um ein Verfahren, das sich vorwiegend für größere Flächen eignet.

Im Rahmen von Vorüberlegungen wurde eingeschätzt, dass auf Grund der zu erwartenden Totholzmenge und einer mindestens erforderlichen Trefferzahl die Gesamtlänge der Intersektlinien ungefähr zwischen 2500 und 5000 m liegen sollte. Um nicht den Charakter einer Vollaufnahme zu erreichen, sollte der Abstand zwischen den parallel ausgelegten Linien mindestens bei zirka 20 bis 30 m liegen. Auf Grund dieser Annahmen wurde eine Flächengröße von ungefähr 10 ha pro Aufnahmefläche hergeleitet.

Die Aufnahmen wurden in Naturwaldreservaten in Rheinland-Pfalz durchgeführt. Für solch große Flächen lagen jedoch an der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft

Rheinland-Pfalz keine Daten von Vollaufnahmen vor. Ein meist ein bis zwei Hektar großer Teil der Naturwaldreservate, der für das ganze Reservat als repräsentativ erachtet wird, ist aber als Kernfläche ausgewiesen. Für diese Kernflächen lagen Ergebnisse von Vollaufnahmen vor. Nun sollte bei der Aufnahme darauf geachtet werden, eine separate Auswertung dieser Kernflächen zu ermöglichen. Auf diesem Wege erhält man für das Naturwaldreservat Wüsttal ein zweiteiliges Inventurergebnis (Tab. 3): Eines für die Kernfläche mit bekannter Grundgesamtheit, aber auch einer geringen Stichprobengröße. Ein zweites Ergebnis für die Gesamtfläche des Naturwaldreservates ist zwar in Bezug auf die Stichprobengröße als genauer einzustufen, kann allerdings nicht direkt mit dem real vorhandenen Totholzvorkommen verglichen werden.

[Tab. 3]

Bei der Kernfläche des Naturwaldreservates Wüsttal beträgt die Abweichung des Stichprobenergebnisses vom realen Totholzvorkommen 1,6 fm/ha. Das sind fast 30%. Bei allerdings nur 380m ausgelegter Linie und sieben Treffern im Bereich der Kernfläche ist diese Abweichung nicht überraschend. Das Stichprobenresultat für die größere Fläche stimmt sehr gut mit der Vollaufnahme der kleineren Kernfläche überein. Es kann allerdings kein Nachweis erbracht werden, dass die Daten der Kernfläche tatsächlich für das gesamte Naturwaldreservat repräsentativ sind. Deshalb kann auch nicht zwingend davon ausgegangen werden, dass das Ergebnis der Stichprobe genau den tatsächlichen Totholzvorrat widerspiegelt.

Im Naturwaldreservat Pfaffenberg ist nur ein Teil der Kernfläche von einem Zaun umgeben, der Rest ist lediglich markiert. Hier wurde die Auswertung getrennt für die gezäunte Fläche, die markierte Fläche, die Kernfläche und das gesamte Naturwaldreservat durchgeführt (Tab. 4).

[Tab. 4]

In der Kernfläche des Naturwaldreservates Pfaffenberg wurden 817m Stichprobenlinie ausgelegt. Dabei wurden 59 Treffer erzielt. Die Abweichung des Stichprobenergebnisses vom realen Totholzvorkommen (24,3 fm/ha) beträgt 2,4 fm/ha, also ca. 10%. Es kommt also trotz eher geringem Stichprobenumfang zu einer relativ guten Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Vorrat der Kernfläche. Bei einer optischen Beurteilung der Verhältnisse in der gezäunten Fläche, der markierten Fläche, der Kernfläche und des gesamten Naturwaldreservates, erscheinen Stichprobenergebnisse vertretbar.

3.2.4 Zeitstudien

Bei den Zeitstudien wurde die Aufstellung von 65 Fluchtstäben berücksichtigt. Im Mittel wurden dabei 5,5 Minuten zur Aufstellung eines Fluchtstabes benötigt. Der durchschnittliche Abstand zwischen den Fluchtstäben beträgt 42m. Somit betrug der durchschnittliche Zeitbedarf zum Einmessen von 100m Intersektlinie rund 12 Minuten.

Dabei darf allerdings nicht übersehen werden, dass die untersuchten Bestände relativ übersichtlich sind. In dichteren Kulturen, Stangenhölzern oder Beständen mit viel Unterstand oder Naturverjüngung werden sich wahrscheinlich sowohl die für die Aufstellung der Fluchtstäbe benötigten Zeiten erhöhen, als auch die Abstände dazwischen verringern. Somit sind die ermittelten Zeiten als eher optimistische Schätzungen einzustufen.

4 Diskussion und Schlussfolgerung

4.1 Forschungsfragen

Zusammenfassend lassen sich die Forschungsfragen wie folgt beantworten:

1. Wie lässt sich die bei gerichteten Stichproben auftretende Verzerrung der Stichprobenergebnisse vermeiden?

Eine Verzerrung lässt sich mit Hilfe der hier vorgestellten Winkelkorrektur für die einzelnen Totholzstücke verhindern.

2. Von welchen Flächeneigenschaften hängen die Verzerrung und die Streuung der Stichprobenergebnisse ab?

Die Linien-Intersekt-Stichprobe liefert auf allen Flächen verzerrungsfreie Ergebnisse, unabhängig von der Art der Totholzverteilung. Die entscheidende Größe für die Genauigkeit des Stichprobenergebnisses ist die Trefferzahl. Bei Flächen mit geringem Totholzvolumen muss mit längeren Intersektlinien gearbeitet werden, um die gleiche Trefferzahl zu erzielen. Bei den Computersimulationen konnten keine Probeflächen erzeugt werden, bei denen die Ergebnisse der Linien-Intersekt-Stichproben durchweg unbrauchbar waren. Lediglich im Falle extrem kurzer, gleich langer Totholzstücke wurde eine systematische Schwäche des Verfahrens ausgemacht. Diese ist allerdings so gering ausgeprägt, dass sie in der Realität wohl keine Rolle spielen dürfte.

3. Wie beeinflusst das Stichprobendesign die Verzerrung und die Streuung der Stichprobenergebnisse?

Bei dem hier vorgestellten Verfahren gibt es nur wenige Restriktionen, die das Stichprobendesign betreffen. Um so mehr besteht aber die Möglichkeit, mit einem durchdachten und vorausschauenden Stichprobenentwurf den Aufwandaufwand bei einer Linien-Intersekt-Stichprobe zu minimieren.

Bei gerichteten Totholzvorkommen kann die Trefferzahl erhöht, und damit das Stichprobenergebnis verbessert werden, wenn die Intersektlinie orthogonal zur Totholzausrichtung gelegt wird.

4.2 Grundgedanken der Intersekt-Stichprobe

Die vorliegende Studie widmet sich der Massenermittlung des liegenden Totholzes mit Hilfe eines Stichprobenverfahrens. Abstrakt können die einzelnen Totholzstücke als in vielen Fällen selten auftretende, linienförmige Objekte beschrieben werden. STAHL (1998) beschreibt Linienstichprobenmethoden allgemein als effektive Stichprobentechniken für solche Objekte. Flächige Stichprobenmethoden, zum Beispiel Probekreisverfahren, eignen sich weitaus weniger für die Untersuchung solcher Objekte als für eine Vielzahl anderer forstlicher Fragestellungen. VAN WAGNER (1982) stellt fest, dass eine gut geplante Linien-Intersekt-Stichprobe für jedes Präzisionsmaß die schnellste und glaubwürdigste Methode ist, die Menge am Boden liegenden Holzes zu ermitteln. Im Verlauf dieser Studie wurde eine Linienstichprobenmethode zur Erfassung des Totholzvorrats entwickelt und untersucht, mit der erstmals eine unverzerrte Abbildung teilweise gerichteter Totholzverteilungen möglich ist. Dies wird durch Aufnahme der Winkel aller getroffenen Totholzstücke erreicht. Dadurch erhält man in der Stichprobe eine für die Grundgesamtheit repräsentative Winkelverteilung der Totholzstücke. Mit diesen Daten ist dann eine der realen Winkelverteilung adäquate Korrektur möglich.

Die Linien-Intersekt-Stichprobe wird in der Praxis in unterschiedlichen Abwandlungen angewendet. Die Unterschiede beginnen schon bei der Durchmesserbestimmung. In dieser Studie

wird zur Volumenermittlung der Mittendurchmesser der Totholzstücke herangezogen, da die Volumenermittlung auf die zu untersuchende Eigenschaft X (Gleichung 1) aufbaut. So werden alle nachfolgenden Überlegungen zur Winkelkorrektur für die einzelnen Totholzstücke möglich. Im Merkblatt „Methoden der Totholzerfassung im Wald“ (MEYER et al. 2002) wird mit einer Formel von HILDEBRANDT (1975) die Gesamtlänge der Linienelemente im Untersuchungsgebiet berechnet und aus den Durchmessern der Totholzstücke an den Schnittpunkten mit den Aufnahmelinien ein mittlerer Durchmesser ermittelt. Dahinter steckt der Gedanke, dass man einen repräsentativen mittleren Durchmesser für das gesamte auf der Fläche vorhandene Holz ermittelt. VAN WAGNER und WILSON (1976) geben als dritte Möglichkeit der Voluminierung noch das Messen beider Enddurchmesser an. In einem Vergleichstest ermitteln sie die geringsten Aufnahmezeiten bei Aufnahme des Durchmessers am Schnittpunkt mit der Intersektlinie. Ein höherer Aufwandaufwand muss in der vorliegenden Arbeit entwickelten Verfahren allerdings in Kauf genommen werden, da die Korrektur für einzelne Winkel nur mit dem zum jeweiligen Totholzstück zugehörigen Durchmesser möglich ist.

MARSHALL et al. (2000), vom British Columbia Ministry of Forests in Nanaimo, Kanada, berechnen den Durchmesser aus den Längen der gedachten Schnitte, die die Intersektlinie am Kreuzungspunkt auf dem Totholzstück erzeugt. Der Durchmesser wird also am Schnittpunkt mit der Intersektlinie, in deren Richtung und nicht rechtwinklig zur Länge des Totholzstückes aufgenommen. Dieses Vorgehen erzeugt große Durchmesser bei steilen Schnittwinkeln. Vermutlich soll so der Treffwahrscheinlichkeit Rechnung getragen werden. Die Frage, ob dies aber zu einem genau so verzerrungsfreien und von der Ausrichtung des Holzes unabhängigen Ergebnis führt, wie die hier entwickelte Winkelkorrektur, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden. Dies ist allerdings nach Meinung der Verfasser zu bezweifeln, da die Überschätzung des Volumens durch die größeren „Durchmesser“ durch eine pauschale Division des Terms durch $\frac{\pi}{2}$ „berichtigt“ wird.

Die von STAHL (1998) entwickelte Kombination von Winkelzählprobe und Linienstichprobe wertet alle Totholzstücke als Treffer, die von der Linie aus gesehen im Spiegelrelaskop breiter als die Visierkante sind. Dadurch wird die Trefferzahl im Vergleich zur Linien-Intersekt-Stichprobe erhöht und die Verzerrungsanfälligkeit des Ergebnisses bei nicht zufällig angeordneten Stichproben sinkt. Es kommt allerdings immer noch zu einer Ergebnisdifferenz, wenn die Stichprobe vollständig parallel zur Linie, oder vollständig orthogonal dazu ausgerichtet ist. Des Weiteren besteht hier auch keine Möglichkeit, eine eventuell als gerichtet erkannte Stichprobe rechnerisch zu korrigieren. Das bedeutet, wenn die Stichprobe beispielsweise in einem Windwurf stattfinden soll, in dem annähernd alle Bäume in gleicher Richtung liegen, besteht nur die Möglichkeit, den Fehler zu akzeptieren oder ein anderes Stichprobenverfahren zu verwenden. In einem von ihm selbst durchgeführten Vergleichstest von Probekreis-, Linien- und Transekt-Relaskop-Stichprobe kommt STAHL (1998) zu dem Ergebnis, dass die Transekt-Relaskop-Stichprobe die kostengünstigste ist.

Ein Vorteil der Linienstichprobenmethoden liegt im sehr geringen Zeitbedarf der Aufnahmen. Fällt aber bei der Suche eines geeigneten Stichprobenverfahrens zur Totholzinventur die Wahl auf eine Linienstichprobenmethode, so muss diese Inventur immer separat durchgeführt werden. Deshalb sollte im Einzelfall geprüft werden, ob der Mehraufwand der Totholzerhebung im Rahmen einer Mehrzweckinventur nicht doch geringer ist als die Kosten einer eigenen Linienstichprobe.

Des Weiteren schränkt auch die recht große Stichprobenmindestgröße den Anwendungsbereich der Linienstichproben ein. Nur bei wirklich weiträumigen Untersuchungsgebieten ist ein Einsatz der Linien-Intersekt-Stichprobe sinnvoll.

Es gibt Bestrebungen, die Totholzforschung in Deutschland vergleichbarer zu machen. Dies soll gelingen, indem man die Ziel- und Aufnahmegrößen bei Totholzinventuren standardisiert und in drei Intensitätsstufen unterteilt (MEYER et al. 2001). Setzen sich solche Aufnahme-standards durch, wäre natürlich eine Modifikation des hier vorgeschlagenen Vorgehens nötig. So müssten zum Beispiel schon bei geringer Aufnahmeintensität bei allen Totholzstücken die Längen gemessen werden.

4.3 Simulationen

Die Überprüfung des Linien-Intersekt-Stichproben-Verfahrens auf eventuelle Schwächen oder systematische Fehler mit Hilfe von Simulationssoftware hat gegenüber einem Praxistest einige Vorteile. Computer-Simulationen erlauben eine Vielzahl von Wiederholungen unter völlig gleichen Rahmenbedingungen bei sehr geringem Zeitaufwand. Ferner können die Rahmenbedingungen, unter denen die Simulationen stattfinden, annähernd unbegrenzt variiert werden. Im vorliegenden Fall beispielsweise die Art und Weise der Totholzverteilung. Besonders wertvoll hat sich dabei erwiesen, dass vor allem Extremsituationen, die in der Natur nur selten vorkommen, aber zur Beurteilung eines Inventurverfahrens sehr wichtig sind, erzeugt werden können. Die Verzerrung und die Streuung der Simulationsergebnisse sind allerdings bei der Interpretation, vor allem in Bezug auf reale Stichproben kritisch zu beurteilen, da hier Überseh-, Mess- und Rechenfehler nicht vorkommen. Sie eignen sich aber hervorragend zum Aufzeigen von Trends und Richtungen der Ergebnisqualität.

4.4 Klumpung

In Fachkreisen wird als besondere Eigenschaft der Totholzverteilung im Wald die räumliche Klumpung angegeben (MEYER et al. 2002). Mit den im Rahmen dieser Studie verwendeten Hilfsmitteln konnte ein eventueller Einfluss einer räumlichen Klumpung nicht genau untersucht werden.

Es erscheint jedoch unwahrscheinlich, dass bei geklumpt vorkommendem Totholz systematische Fehler bei Anwendung der vorgeschlagenen Methode auftreten. Dagegen sprechen auch die guten Ergebnisse im Praxistest, da hier das Totholz natürlich und dementsprechend auch in gewissem Maße geklumpt vorkam.

Jedoch scheint es nahe liegend, dass bei einer Klumpung die Stichprobengröße erhöht werden muss, um Ergebnisse von gleicher Genauigkeit wie bei gleichmäßiger Verteilung zu erhalten. Diese Überlegung unterstreichen auch die Untersuchungen von PICKFORD und HAZARD (1978 und 1986). Sie beschäftigten sich zwar nicht mit der Klumpung, aber mit den Qualitäten der Stichprobenergebnisse von Linien-Intersekt-Stichproben bei unterschiedlichen Fäll- und Rückestrategien. Einmal sollte das eingeschlagene Holz mit einem Schlepper gerückt werden. Beim zweiten Beispiel sollte das Holz mit Seilkränen ins Tal gebracht werden und war deshalb schon in Richtung der nächsten Seiltrasse gefällt worden. Dadurch lag im zweiten Beispiel eine linienförmige Klumpung in Richtung der Seiltrassen vor. Bei diesen Untersuchungen kommen die beiden Wissenschaftler zu folgendem Ergebnis:

Die „Schlepperfläche“ benötigt einen geringeren Aufnahmearbeit als die „Seilkränfläche“, um gleiche Präzisionsanforderungen zu erfüllen. Dieser Unterschied beim Aufnahmearbeit wird allerdings umso geringer, je größer die Stichprobe wird.

4.5 Schlussfolgerungen

Im Verlauf der vorliegenden Studie wurde eine praktikable und zuverlässige Methode zur Inventur von liegendem Totholz entwickelt und vorgestellt. Wie alle Inventurverfahren hat

auch diese Methode ganz spezifische Vor- und Nachteile. Ob die Linien-Intersekt-Stichprobe mit Winkelkorrektur für einzelne Totholzstücke bei einem bestimmten Inventurvorhaben zum Einsatz kommt, muss im Einzelfall entschieden werden. Dazu müssen bei der Planung präzise und vorausschauend die Inventurziele und sonstigen Rahmenbedingungen definiert werden. Diese haben entscheidenden Einfluss auf die Anforderungen, die an die jeweilige Inventurmethode gestellt werden. Aufbauend auf diese Vorüberlegungen können die Stärken und Schwächen der einzelnen Verfahren gegeneinander abgewogen und das am besten geeignete Verfahren gefunden werden.

Dabei bleibt allerdings zu bedenken, dass man sich mit einem Linien-Stichprobenverfahren immer für eine eigenständige Inventur für Totholz und gegen eine Mehrzweckinventur mit all ihren Vor- und Nachteilen entscheidet.

Im Vergleich mit anderen Linien-Stichprobenverfahren hat die hier entwickelte Methode die folgenden Besonderheiten:

- Durch die Winkelkorrektur brauchen die Intersektlinien nicht in verschiedenen Himmelsrichtungen ausgerichtet sein, um eventuell gerichtete Totholzvorkommen unverzerrt wiederzuspiegeln. Dadurch ergibt sich erst die Option, die Intersektlinien hangparallel auslegen zu können, was bei nicht ebenen Geländebeziehungen unabdingbar ist. Wenn ein hangparalleles Arbeiten nicht möglich ist, ist an vielen Stellen die Effektivität oder sogar die Durchführbarkeit der Stichprobe in Frage gestellt.
- Sollte es in einem Inventurgebiet zu einer Stichprobe kommen, in dem ein gerichtetes Auftreten des Totholzes erwiesen ist, ist mit den meisten anderen Linien-Stichprobenverfahren nur eine Minimierung der Verzerrung möglich, mit der Winkelkorrektur ist sie völlig zu vermeiden.
- Der Aufnahmearbeit ist höher als bei einigen anderen Methoden, da die Mittendurchmesser anstatt der Durchmesser am Schnittpunkt mit der Intersektlinie und die Winkel der Totholzstücke gemessen werden. Die Möglichkeit die an dem jeweiligen Schnittpunkt von Totholzstück und Intersekt-Linie gemessenen Durchmesser für eine verzerrungsfreie Totholzschätzung einzusetzen, sollte weitergehenden Untersuchungen getestet werden. Dieses Vorgehen könnte die Aufnahmeeffizienz noch erhöhen.
- Durchmesser Der größere Aufnahmearbeit muss allerdings nicht zwangsläufig zu einem größeren Zeitaufwand führen, da bei dem hier verwendeten Verfahren stets hangparallel gearbeitet werden kann. So entfällt eine zeitaufwändige und anstrengende Überwindung größerer Höhenunterschiede.

Eine Verbesserung von Sendeleistung und Genauigkeit bei GPS-Empfängern könnte künftig auch deren Einsatz ermöglichen. Möglicherweise könnte diese technische Neuerung den gesamten Arbeitsablauf bei der Durchführung von Linienstichprobenverfahren vereinfachen und beschleunigen.

Für die Zukunft bleibt abzuwarten, ob sich die Linien-Stichproben oder doch die Mehrzweckinventuren zur Erfassung des liegenden Totholzes durchsetzen. Eventuell werden weitere Neuerungen bei der Luftbildtechnik und computergesteuerten Auswertung terrestrische Inventurverfahren künftig weitgehend überflüssig machen.

5 Danksagung

Die vorliegende Studie wurde von der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz angeregt und sowohl finanziell wie auch in praktischer Art bei den Feldaufnahmen unterstützt. Herrn Prof. Dr. Axel Roeder und seinen Mitarbeitern/innen, stellvertretend sei hier Frau Dr. Patricia Balcar genannt, soll hierfür herzlich gedankt werden. Dank gilt auch zwei anonymen Gutachtern, die sich äußerst gründlich mit dem Manuskript auseinandergesetzt und zahlreiche konstruktive Anregungen gemacht haben.

6 Literatur

- ALBRECHT, L. (1991): Die Bedeutung des Totholzes im Wald. *Forstw. Cbl.* 110: S. 106-113.
- AMMER, U. (1991): Konsequenzen aus den Ergebnissen der Totholzforschung für die forstliche Praxis. *Forstw. Cbl.* 110: S. 149-157.
- ARBEITSKREIS FORSTLICHE LANDESPFLEGE IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (1984): Biotop-Pflege im Wald, ein Leitfaden für die forstliche Praxis. Greven: Kilda-Verlag. 230 S.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1990): Inventurbericht und Übersichtstabellen für das Bundesgebiet nach dem Gebietsstand vor dem 3.10.1990 einschließlich Berlin (West). 118 S.
- HANSEN, M. H. (1985): Line Intersect Sampling of Wooded Strips. *Forest Science* 31(2): 282-288.
- HILDEBRANDT, G. (1975): Ermittlung der Länge linienförmiger Geländeobjekte. *Allgem. Forstzeitschrift* 30: 29-31.
- HOFFMANN, B. (2001): Untersuchung zum Monitoring von Naturwäldern mit Hilfe von Geoinformationssystemen, modernen Luftbilddauswertungsverfahren und Geostatistik dargestellt am Beispiel des nordrhein-westfälischen Naturwaldreservats Hellerberg. Diss. Univ. Göttingen. Cuvillier Verlag Göttingen.
- KAISER, L. (1983): Unbiased Estimation in Line-Intercept Sampling. *Biometrics* 39: 965-976.
- KENNEL, E. (2002): FORTRAN-Programme, unveröffentlicht.
- KÖLBEL, M. (2001): Auswertung. In: P. MEYER, J. ACKERMANN, P. BALCAR, J. BODDENBERG, R. DETSCH, B. FÖRSTER, H. FUCHS, B. HOFFMANN, W. KEITEL, M. KÖLBEL, C. KÖTHKE, H. KOSS, W. UNKRIEG, J. WEBER, J. WILLIG (2001): Untersuchung der Waldstruktur und ihrer Dynamik in Naturwaldreservaten. Eching: IHW-Verlag. 107 S.
- MARSHALL, P.L., DAVIS, G., LEMAY, V.M. (2000): Using Line Intersect Sampling for Coarse Woody Debris. <http://www.for.gov.bc.ca/Vancouver/research/cwd/tr003.pdf>
- MCRAE, D.J., M.E. ALEXANDER, and B.J. STOCKS (1979): Measurement and description of fuels and fire behaviour on prescribed burns: a handbook. *Can. For. Serv. Rep. O-X-287*, Great Lakes For. Res. Cent., 56pp. Zitiert von WAGNER, C. E. VAN (1982)
- MEYER, P., J. ACKERMANN, P. BALCAR, J. BODDENBERG, R. DETSCH, B. FÖRSTER, H. FUCHS, B. HOFFMANN, W. KEITEL, M. KÖLBEL, C. KÖTHKE, H. KOSS, W. UNKRIEG, J. WEBER, J. WILLIG (2001): Untersuchung der Waldstruktur und ihrer Dynamik in Naturwaldreservaten. Eching: IHW-Verlag. 107 S.

- MEYER, P., N. BARTSCH und ARBEITSKREIS FORSTLICHER LUFTBILDINTERPRETEN (2002): Merkblatt; Methoden der Totholzerfassung im Wald; erarbeitet im Auftrag der Sektion Waldbau des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten. Unveröffentlicht.
- PICKFORD, S. G. und HAZARD, J. W. (1978): Simulation Studies on Line Intersect Sampling of Forest Residue. *Forest Science* 24: 469-483.
- PICKFORD, S. G. und HAZARD, J. W. (1986): Simulation Studies on Line Intersect Sampling of Forest Residue, Part II. *Forest Science* 32: 447-470.
- REFA-FACHAUSSCHUSS FORSTWIRTSCHAFT (1998): Arbeitsstudien, Arbeitsorganisation und Qualitätsmanagement in der Forstwirtschaft. Stuttgart: IFAO. 175 S.
- ROTH, A. (2003): Die Linien-Intersekt-Stichprobe: Ein effizientes Verfahren zur Erfassung von liegendem Totholz? Diplomarbeit, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement, TU München.
- SCHERZINGER, W. (1996): Naturschutz im Wald, Qualitätsziele einer dynamischen Waldentwicklung, Praktischer Naturschutz. Stuttgart: Ulmer. 447 S.
- STAHL, G. (1998): Transect Relascope Sampling – A Method for the Quantification of Coarse Woody Debris. *Forest Science* 44: 58-63.
- STAHL, G. (2000): Guided Transect Sampling for Assessing Sparse Populations. *Forest Science* 46: 108-115.
- UTSCHICK, H. (1991): Beziehungen zwischen Totholzreichtum und Vogelwelt in Wirtschaftswäldern. *Forstw. Cbl.* 110: 135-148
- VRIES, PIETER G. DE (1974): Multi-Stage Line Intersect Sampling. *Forest Science* 20: 129-133.
- VRIES, PIETER G. DE (1986): Sampling Theory for Forest Inventory, A Teach-Yourself Course. Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg.
- WAGNER, C. E. VAN (1968): The Line Intersect Method In Forest Fuel Sampling. *Forest Science* 14: 20-26.
- WAGNER, C. E. VAN (1982): Practical Aspects of the Line Intersect Method.
<http://www.for.gov.bc.ca/Vancouver/research/cwd/practcl.pdf>
- WAGNER, C. E. VAN und WILSON, A.L. (1976): Diameter measurement in the Line Intersect Method. *Forest Science* 14: 20-26.
- WARREN, W. G. und OLSEN, P. F. (1964): A Line Intersect Technique For Assessing Logging Waste. *Forest Science* 10: 267-276.

Anschrift der Verfasser: Forstreferendar Diplom-Forstwirt A. ROTH, Prof. Dr. E. KENNEL, PD DR. TH. KNOKE, Fachgebiet für Waldinventur und Forstbetriebsplanung, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement, TU München, Am Hochanger 13, 85354 Freising. Dr. U. MATTHES, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Schloss, 67705 Trippstadt.

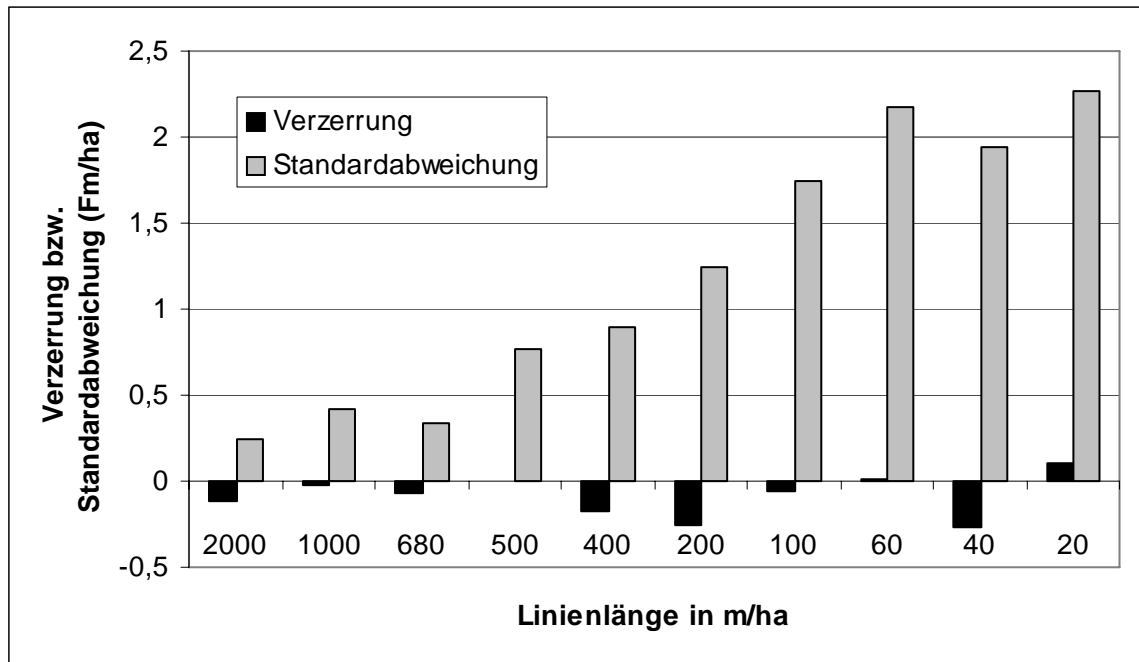


Abb. 1. Durchschnittliche Abweichung der Stichprobenergebnisse vom wahren Wert und deren Standardabweichung über der Linienlänge

Figure 1. Bias of samples and standard deviation of samples depending on the length of the intersect-line

Tab. 1. Simulationsergebnisse für unterschiedliche Winkel der Intersektlinie bei teilweise gerichteter Orientierung des Totholzes (mittlere Ausrichtung des Totholzes gegen Nord 105 Grad, Standardabweichung 70 Grad)

Table 1. Results of simulations for various angles of the intersect-lines when the logs are partly oriented (mean orientation of the logs toward the north 105 degrees, standard deviation 70 degrees)

Winkel	korrigierte Werte					unkorrigierte Werte				
	$\bar{\hat{X}}$	$s_{\hat{X}}$	Bias	$s_{\hat{X}}$	Stand. Bias	$\bar{\hat{X}}$	$s_{\hat{X}}$	Bias	$s_{\hat{X}}$	Stand. Bias
10	3,86	1,25	0,11	0,18	0,62	3,71	0,88	-0,04	0,13	0,32
30	3,59	1,5	-0,16	0,21	0,75	3,59	0,7	-0,16	0,10	1,60
50	4,11	1,33	0,36	0,19	1,91	3,41	0,73	-0,34	0,10	3,26
70	3,69	1,24	-0,06	0,18	0,34	3,49	0,8	-0,26	0,11	2,28
90	3,77	1,27	0,02	0,18	0,11	3,4	1,33	-0,35	0,19	1,84
110	3,61	1,15	-0,14	0,16	0,86	3,62	0,52	-0,13	0,07	1,75
130	3,64	1,58	-0,11	0,22	0,49	3,66	1	-0,09	0,14	0,63
150	4,09	1,82	0,34	0,26	1,32	3,86	0,83	0,11	0,12	0,93

Winkel der Taxationslinie gegen Nord (in Grad), $\bar{\hat{X}}$ = Mittelwert aus 50 simulierten Linien-Intersekt-Stichproben, $s_{\hat{X}}$ = Standardabweichung der einzelnen Stichprobenergebnisse von $\bar{\hat{X}}$, Bias = durchschnittliche Differenz zwischen Stichprobenergebnis und wahren Wert (wahrere Wert: 3,75 Fm/ha), $s_{\hat{X}}$ = Standardfehler einer Simulationsreihe ($= \frac{s_{\hat{X}}}{\sqrt{50}}$), Stand. Bias = standardisierter Bias ($= \frac{Bias}{s_{\hat{X}}}$), grau hinterlegt: signifikanter Bias.

Tab. 2. Simulationsergebnisse für unterschiedliche Winkel der Intersektlinie bei vollständig gerichteter Orientierung des Totholzes (mittlere Ausrichtung des Totholzes gegen Nord 105 Grad, Standardabweichung 0 Grad)

Table 2. Results of simulations for various angles of the intersect-lines when the logs are completely oriented (mean orientation of the logs toward the north 105 degrees, standard deviation 0 degrees)

Winkel	korrigierte Werte					unkorrigierte Werte				
	$\bar{\hat{X}}$	$s_{\hat{X}}$	Bias	$s_{\hat{X}}$	Stand. Bias	$\bar{\hat{X}}$	$s_{\hat{X}}$	Bias	$s_{\hat{X}}$	Stand. Bias
10	3,69	0,65	-0,06	0,09	0,65	5,77	1,02	2,02	0,15	13,86
30	3,7	0,57	-0,05	0,08	0,61	5,38	0,82	1,63	0,12	13,91
50	3,88	0,82	0,13	0,12	1,11	4,99	1,06	1,24	0,15	8,19
70	3,69	0,9	-0,06	0,13	0,47	3,32	0,82	-0,43	0,12	3,67
90	3,54	1,91	-0,21	0,27	0,77	1,39	0,77	-2,36	0,11	21,45
110	3,44	2,64	-0,31	0,38	0,82	0,43	0,33	-3,32	0,05	70,42
130	3,43	1,59	-0,32	0,23	1,41	2,32	0,97	-1,43	0,14	10,32
150	3,72	0,67	-0,03	0,10	0,31	3,96	0,82	0,21	0,12	1,79

Winkel der Taxationslinie gegen Nord (in Grad), $\bar{\hat{X}}$ = Mittelwert aus 50 simulierten Linien-Intersekt-Stichproben, $s_{\hat{X}}$ = Standardabweichung der einzelnen Stichprobenergebnisse von $\bar{\hat{X}}$, Bias = durchschnittliche Differenz zwischen Stichprobenergebnis und wahren Wert (wahrere Wert: 3,75 Fm/ha), $s_{\hat{X}}$ = Standardfehler einer Simulationsreihe ($= \frac{s_{\hat{X}}}{\sqrt{50}}$), Stand. Bias = standardisierter Bias ($= \frac{Bias}{s_{\hat{X}}}$), grau hinterlegt: signifikanter Bias.

Tab. 3. Stichprobenergebnis und tatsächliches Totholzvolumen im NWR Wüsttal

Table 3. Results of sampling and true coarse woody debris at „Naturwaldreservat Wüsttal“

	Stichprobenergebnis		Ergebnis der Vollaufnahme
	Gesamt	Kernfläche	Kernfläche
Linienlänge (m)	2488	380	
Anzahl der Treffer	49	7	
Ergebnis (fm/ha)	5,8	3,9	5,5

Tab. 4. Stichprobenergebnis und tatsächliches Totholzvolumen im NWR Pfaffenberg

Table 4. Results of sampling and true coarse woody debris at „Naturwaldreservat Pfaffenberg“

	Stichprobenergebnis				Ergebnis der Vollaufnahme
	Gesamt	Zaun	Markierung	Kernfläche	Kernfläche
Linienlänge (m)	3795	393	424	817	
Anzahl der Treffer	160	22	37	59	
Ergebnis (fm/ha)	16,2	17,9	34,9	26,7	24,3