

Zur Auswirkung der Hangneigungskorrektur auf Schätzwerte im Schweizerischen Landesforstinventar (LFI)

MICHAEL KÖHL und PETER BRASSEL

Keywords: Forest inventory; slope correction method; Swiss National Forest Inventory. FDK 524.6 : (494)

Abstract: For forest inventories on slopes, it is necessary to correct the test areas, because the circular areas, when projected, become elliptical. Based on 93 samples from the Swiss National Forest Inventory (FNI), it was determined whether the simplified method, which increases the radius to match that of the elliptical area, leads to a distortion of the results. An average deviation of 2% was found between the FNI estimated values and the actual values for the basal area and the number of stems. For estimations of smaller units, greater distortions of the results are expected.

Abstract: Bei Forstinventuren in geneigtem Gelände sind die Probeflächen zu korrigieren, da die Kreisflächen in der Projektion zu Ellipsen werden. Anhand von 93 Proben aus dem Schweizerischen Landesforstinventar (LFI) wird untersucht, ob die vereinfachte Methode mit einer der Ellipsenfläche entsprechenden Vergrößerung des Radius zu verzerrten Ergebnissen führt. Im Mittel wurde eine Abweichung der LFI-Schätzwerte von den wahren Werten für die Basalfläche und die Stammzahl um 2% gefunden. Für kleinere Aussageeinheiten sind grössere Verzerrungen zu erwarten.

1. Einleitung

Sämtliche Angaben bei Forstinventuren beziehen sich auf horizontale Flächen. Die Konvention dient dazu, erhobene Daten zu standardisieren und forstliche Statistiken und Kennwerte mit anderen, insbesondere kartierten Informationen vergleichbar zu machen.

Neben dem relativ trivialen Kriterium der Vergleichbarkeit der Daten spielt das Design der Stichprobeneinheit eine entscheidende Rolle bei der Festlegung der Auswahlwahrscheinlichkeit einzelner Bäume. Sollen die Aussagen einer Stichprobeninventur auf eine horizontale Fläche bezogen werden, muss auch die Auswahlwahrscheinlichkeit auf die Horizontale bezogen sein. Bei der Aufnahme von Stichprobeneinheiten (Winkelzählproben, feste oder konzentrische Probeflächen, Stammabstandsverfahren) in geneigtem Gelände müssen Vorkehrungen getroffen werden, welche die Herstellung des Bezugs zu einer horizontalen Fläche sicherstellen und damit konstante Auswahlwahrscheinlichkeiten garantieren. Da konstante Auswahlwahrscheinlichkeiten der Einzelbäume sowohl im ersten als auch im zweiten LFI bei der Entwicklung der Schätzprozeduren unterstellt wurden, müssen die Probeflächen in geneigtem Gelände so angepasst werden, dass die Auswahlwahrscheinlichkeiten in der Horizontalen konstant bleiben. Unterbleibt die Anpassung oder erfolgt sie fehlerhaft, sind verzerrte Ergebnisse eine unmittelbare Folge.

In der Schweiz sind geneigte Flächen keine Seltenheit: Etwa 1,8% des Waldes (rund 21 500 ha) weisen Hangneigungen von über 100% auf, rund 20% Hangneigungen über 40% (EIDG. ANSTALT FÜR DAS FORSTLICHE VERSUCHSWESSEN (EAFV), 1988, Tabelle 44). Da Wälder in stark geneigtem Gelände häufig Schutzfunktionen erfüllen, verdienen sie eine besondere Aufmerksamkeit.

Ziel der hier vorgestellten Studie ist die Überprüfung der Methode zur Korrektur der Probeflächengrösse des LFI in geneigtem Gelände. Skizziert werden potenzielle Auswirkungen von fehlerhaften Feldaufnahmen oder Korrekturen auf die Resultate.

2. Methoden zur Hangneigungskorrektur und Anwendungen in anderen europäischen Ländern

Zur Herstellung des Bezugs zur Horizontalebene bei der Messung von Probeflächen mit fester (horizontaler) Grösse stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung (ZÖHRER, 1980):

- horizontale Grenzbaumkontrolle;
- Auslegung der Probefläche in der Schrägfläche;
- Ellipse am Hang, die in der Projektion einen konstanten Kreis ergibt;
- Radiusvergrößerung in der Schräglage;
- Benutzung optischer Distanzmesser mit einer Vertikalbasis im Zentrum.

Jede dieser Varianten hat spezifische Vor- und Nachteile. Die horizontale Grenzbaumkontrolle ist bei starker Hangneigung nicht möglich. Die Auslegung der Probefläche in der Schrägfläche erfordert eine nicht triviale Reduktion der Horizontalfläche und führt zu unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren für Einzelbäume. Die Auslegung einer Ellipse am Hang ergibt in der Horizontalprojektion einen Kreis, erfordert aber im Gelände die Bestimmung der Horizontalabstand vom Stichprobenzentrum zu jedem potenziellen Probebaum. Dies geschieht entweder durch direkte Messung der Horizontalabstand oder durch Umrechnung der schrägen Entfernung über den Neigungswinkel Probezentrum/Baum. Dieses Vorgehen wird besonders bei der Entfernungsmessung mit Hilfe des Massbandes als störend und zu arbeitsintensiv empfunden. Die Radiusvergrößerung in der Schräglage ist zwar ein intuitiv einfaches Verfahren, hat aber den Nachteil, dass Fehler bei der Bestimmung der Hangneigung zu einer fehlerbehafteten Anpassung des Radius der Schräglage führen und damit die Aufnahmewahrscheinlichkeiten der Bäume in Hanglage nicht der von Bäumen in der Horizontalen entsprechen. Die Erhebung führt dann im Vergleich zur Horizontalprojektion zum Einschluss zu vieler oder zu weniger Bäume. Zudem wirkt sich beim Verfahren der Radiusvergrößerung negativ aus, dass die Anisotropie am Hang von vornherein ausgeschlossen wird¹.

In den Bundeswaldinventuren in Deutschland und Österreich werden Winkelzählproben mit dem Spiegelrelaskop aufgenommen. Das Relaskop passt die Zählbreite automatisch der Hangneigung an, d.h. es wird eine (virtuelle) Ellipse am Hang aufgenommen. Bei den Betriebsinventuren in Deutschland wird die horizontale Entfernung zwischen Probebäumen und Stichprobenzentrum zur Grenzbaumkontrolle gemessen,

¹ Das Verfahren führt somit nur dann zu unverzerrten Schätzwerten, wenn die Abstände zwischen den Bäumen nicht abhängig von der Hangneigung sind, d.h. die Stammabstände unabhängig vom Neigungswinkel zwischen zwei benachbarten Baumarten sind.

so dass auch hier Ellipsen am Hang entstehen (Schöpfer, mündliche Mitteilung). Der US Forest Service verwendet ebenfalls keine flächengleichen Kreise am Hang, sondern misst Ellipsen ein (Scott, Lund, USDA Forest Service, mündliche Mitteilung).

Im Schweizerischen Landesforstinventar werden als Stichprobeneinheit konzentrische Probekreise verwendet (siehe *Abbildung 1*). Auf einem Kreis mit 200 m² Fläche (entspricht einem Radius von $r = 7,98$ m) werden alle Bäume mit Brusthöhendurchmesser, $d_{1,3}$, grösser oder gleich 12 cm als Probebäume erfasst, auf einem Kreis mit 500 m² ($r = 12,62$ m) alle Bäume mit $d_{1,3}$ grösser oder gleich 36 cm (ZINGG, 1988). Diese Flächenangaben beziehen sich auf horizontale Probeflächen, d.h. eine Hangneigung von 0%.

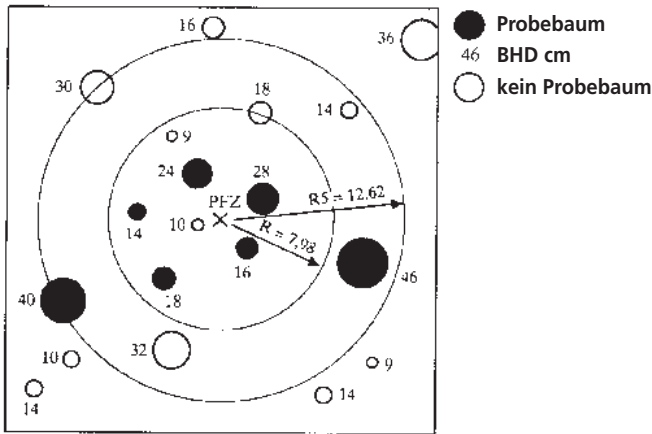


Abbildung 1: Stichprobeneinheit des LFI (aus ZINGG, 1988, S. 72).

Figure 1: Sample plot of the Swiss National Inventory (NFI).

Nach ZINGG (1988) werden «die Radien in geneigtem Gelände korrigiert, die Horizontalprojektion der Aufnahmefläche ist konstant». Somit wird im LFI als Methode zur Hangkorrektur die Radiusvergrößerung in der Schräglage angewendet, und in der geneigten Fläche werden zwei konzentrische Kreise aufgenommen, deren Projektionen in die Horizontale Ellipsen mit einer Fläche von 200 m² bzw. 500 m² ergeben.

Die Hangneigung wird durch die Messung zweier Neigungswinkel mit dem Gefällsmesser (Ableseung auf 1%) und anschliessender Mittelbildung bestimmt. Nach ZINGG (1988) erfolgt die «Messung der Neigung in Richtung der Falllinie hangabwärts und hangaufwärts zum tiefsten bzw. höchsten Punkt in 15 m Entfernung vom Stichprobenzentrum.» Die Verwendung des «tiefsten bzw. höchsten Punktes» zur Bestimmung der Hangneigung führt streng genommen nur dann zu einem unverzerrten Neigungswert, wenn der Hang einer planen Fläche entspricht. Bei der im LFI vorgegebenen Messvorschrift werden die Reliefenergie und kleinräumige topographische Variationen nicht berücksichtigt, da immer die grösstmögliche Hangneigung ermittelt wird. Dies führt zwangsläufig zur Aufnahme der grösstmöglichen Fläche, d.h. dem grösstmöglichen korrigierten Radius, und damit zum Einschluss eines Maximums an Probebäumen. Damit ist eine Überschätzung sämtlicher am Einzelbaum erhobener sowie mit Einzelbaumdaten abgeleiteter Attribute wahrscheinlich. Zur Milderung dieser Problematik wird in der LFI-Aufnahmeanweisung (ZINGG, 1988, S. 73) das Vorgehen bei der Neigungsbestimmung für Sonderfälle wie Probeflächen an einer Hangkante explizit dargestellt.

Die Korrektur des Radius am Hang $\langle r \rangle$, wird über (KRAMER und AKÇA, 1982)

$$r^2 = \frac{r}{\sqrt{\cos \alpha}}$$

vorgenommen, wobei r der Radius des horizontalen Kreises und α die Hangneigung ist. Neben der Berechnung der korrigierten Radien können Tabellen zur Bestimmung der korrigierten Kreisradien verwendet werden (siehe z.B. SCHMID-HAAS *et al.*, 1978; ZINGG, 1988).

3. Datenmaterial und Methode

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden im Sommer 1996 in sieben Testregionen der Schweiz 93 permanente Probeflächen des LFI mit insgesamt 1513 Bäumen aufgesucht. In *Tabelle 1* sind die besuchten Proben geordnet nach Region und Hangneigungsklasse gelistet. Knapp ein Viertel der Proben weist eine Hangneigung von über 80% auf. Im Mittel weisen die Proben eine Hangneigung von 72% auf mit einem Minimum von 40% (Biasca) und einem Maximum von 117% (Valais). Die mittlere Hangneigung liegt in den Regionen zwischen 68% (Klöntal) und 86% (Osogna).

Tabelle 1: Anzahl Proben (n) je Testregion und Hangneigungsklasse.

Table 1: Number of plots according to test region and slope class.

Region	n	Hangneigung [%]			
		40–59	60–69	70–79	>=80
Klöntal	n	5	3	2	3
Muotatal	n		3	3	2
Biasca	n	2	2	4	1
Osogna	n			1	1
Locarno	n	2	6	1	3
Valais	n	7	12	4	9
Davos	n	5	5	3	4
Gesamt	n	21	31	18	23
	(%)	22,58	33,33	19,35	24,72

Den Feldequipen wurden als Vorgabe Daten zur Verfügung gestellt, die im zweiten LFI erhoben wurden. Dies waren neben den Einmessprotokollen für jede Probefläche Angaben zu den Einzelbäumen wie Baumart, $d_{1,3}$, Distanz zum Probenzentrum und Azimut sowie die im LFI bestimmte Hangneigung. An allen vom LFI erfassten Probebäumen sowie an allen potenziellen Probebäumen² wurden die horizontalen Entfernungen zum Stichprobenzentrum bestimmt. Diese Entfernung wurde zur Grenzbaumkontrolle verwendet. War ein im LFI erfasster Baum nicht mehr vorhanden, wurde der Grund angegeben (Mortalität, Nutzung, nicht aufgefunden). Die Horizontalabstand wurde verwendet, um die Bäume in drei Klassen einzuteilen:

- Bäume, die vom LFI erfasst wurden und eine Horizontalabstand zum Probeflächenzentrum von weniger als 7,98 m (für $d_{1,3} > 12$ cm) bzw. weniger als 12,62 m (für $d_{1,3} > 35$ cm) haben (Bezeichnung: vom LFI korrekt erfasst);
- Bäume, die zwar vom LFI erfasst wurden, aber eine Horizontalabstand von mehr als 7,98 m (für $d_{1,3} > 12$ cm) bzw. mehr als 12,62 m (für $d_{1,3} > 35$ cm) haben (Bezeichnung: vom LFI fälschlicherweise erfasst);
- Bäume, die vom LFI nicht erfasst wurden, aber eine Horizontalabstand von weniger als 7,98 m (für $d_{1,3} > 12$ cm) bzw. weniger als 12,62 m (für $d_{1,3} > 35$ cm) haben (Bezeichnung: vom LFI fälschlicherweise nicht erfasst).

In der Klasse «vom LFI korrekt erfasst» wurden 1354 Bäume erfasst, in den Klassen «vom LFI fälschlicherweise erfasst» und «vom LFI fälschlicherweise nicht erfasst» 94 bzw. 65 Bäume. Die Kombination der Klassen «vom LFI korrekt erfasst» und «vom LFI fälschlicherweise erfasst» ergibt einen Kreis mit entsprechender Hangneigung korrigiertem Radius, die Klassen

² Horizontalabstand zum Probeflächenzentrum 7,98 m bzw. 12,62 m.

«vom LFI korrekt erfasst» und «vom LFI fälschlicherweise nicht erfasst» ergeben idealisiert für eine schiefe Ebene eine Ellipse, d.h. die Projektion des Horizontalkreises in den Hang (Abbildung 2).

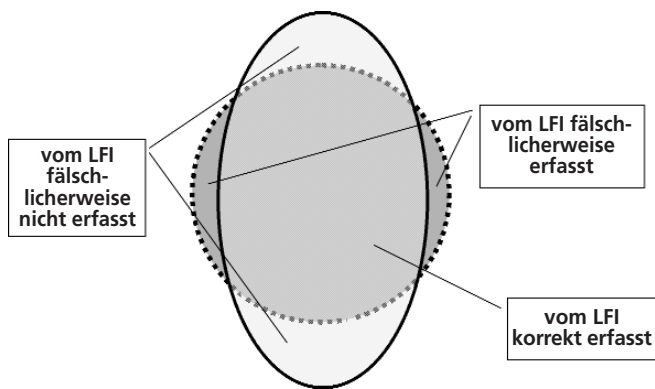


Abbildung 2: Ellipse und radiuskorrigierter Probekreis am Hang.
 Figure 2: Ellipse and circle adjusted for radius in the inclined plane.

Die Messung der Horizontalentfernung stellt sicher, dass die Ellipse am Hang die korrekte Projektion des Horizontalkreises ist. Variationen des Kleinreliefs werden hierbei kompensiert, da die Horizontalabstand direkt vom Neigungswinkel des Baumes in Bezug auf das Probeflächenzentrum berechnet wird. Die Korrektur des Radius und die Auslegung eines Kreises am Hang kann solche Variationen des Kleinreliefs nicht berücksichtigen. Es wird vielmehr theoretisch davon ausgegangen, dass der Hang eine geneigte Fläche ohne Reliefunterschiede darstellt. Wird zusätzlich beachtet, dass die Messvorschrift zur Bestimmung der Hangneigung zur Überschätzung und damit zu verzerrten Ergebnissen tendiert, sind für die im LFI gewählte Methode zur Hangkorrektur Abweichungen von der definierten, durchmesserabhängigen Auswahlwahrscheinlichkeit von Einzelbäumen zu erwarten. Daher werden für den folgenden Vergleich die Messwerte der Horizontalabstände als «wahre Werte» verwendet.

In *Abbildung 3* sind die schrägen Entfernungen der Einzelbäume vom Stichprobenzentrum über den entsprechenden Horizontalabstände aufgetragen. Erwartungsgemäss liegen die meisten Datenpunkte oberhalb einer Geraden mit Steigung eins. Lediglich bei zwölf Bäumen (0,79 %) wurde eine Horizontalabstand bestimmt, die grösser ist als die im LFI bestimmte schräge Entfernung. Bei vier dieser zwölf Bäume konnte im Rahmen der Plausibilitätsprüfung der Daten festgestellt werden, dass es sich um Fehler bei der Datenerfassung handelt. Die betreffenden vier Bäume wurden bei der weiteren Analyse ausgeschlossen. Bei zwei Bäumen war der Unterschied zwischen Horizontalabstand und vom LFI erfasster Abstand geringer als 1 dm. Da die Fehler der Abstandbestimmung allerdings nicht entscheidend für die Auswahl der verbleibenden acht Bäume als Probeflächen war, kann ein Einfluss auf die Ergebnisse der Studie ausgeschlossen werden.

Die Untersuchungen stützen sich auf die beiden Attribute Stammzahl und Grundfläche. Ein Vergleich mit dem Einzelbaumvolumen war nicht möglich, da für die in der Klasse «vom LFI fälschlicherweise nicht erfasst» aufgenommenen Bäume das Einzelbaumvolumen nicht zur Verfügung stand. Aussagen über die Genauigkeit der Volumenschätzung lassen sich aber direkt aus der Betrachtung der Grundflächenschätzung ableiten, da Vorrat und Grundfläche bei der Anwendung eines Volumentarifs mit $v = f(d_{1,3})$ funktional miteinander verbunden sind. Die Ergebnisse der Stammzahlschätzung geben Hinweise auf die Verzerrung bei einzelbaumbezogenen, qualitativen Merkmalen wie Stammschäden oder Kronformen.

4. Ergebnisse

Die Daten der Untersuchung wurden im Sinne einer explorativen Datenanalyse mit graphischen Methoden und anhand von Tabellen ausgewertet. Im Folgenden werden zunächst die Schätzwerte der LFI-Methode für die Basalfläche und die Stammzahl den korrekten Werten der Messung einer Ellipse am Hang gegenübergestellt. Hierbei erfolgt eine getrennte Betrachtung für die Testregionen sowie für verschiedene Neigungsklassen. Dem Vergleich der Standardfehler der Schätzungen schliesst sich eine Überprüfung durch statistische Signifikanztests an. Ziel dieser Darstellungen ist es, mögliche Verzerrungen durch die im LFI verwendete Methode zur Neigungskorrektur aufzuzeigen. Die Auswirkungen der Ergebnisse dieser Untersuchung auf die Resultate des LFI sowie Schlussfolgerungen für Modifikationen der Erhebungsmethode finden sich im letzten Kapitel.

4.1 Vergleich der absoluten Schätzwerte

In den *Abbildungen 4 bis 7* sind die absoluten Schätzwerte der Basalflächen und der Stammzahl, die nach der im LFI praktizierten Methode zur Hangkorrektur ermittelt wurden, über den korrekten Basalflächen für jede der 93 Probeflächen aufgetragen. Die Einzelbaumwerte wurden hierbei mit den im LFI verwendeten Hochrechnungsfaktoren gewichtet, so dass die unterschiedlichen Aufnahmewahrscheinlichkeiten der Bäume zwischen 12 und 35 cm BHD sowie über 35 cm BHD berücksichtigt werden konnten. Die Einzelbaumwerte wurden sowohl für die Regionen (Klöntal, Muotatal, Biasca, Osogna, Locarno, Valais und Davos) als auch für die Neigungsklassen (40 bis 59%, 60 bis 69%, 70 bis 79% und grösser als 79%) dargestellt.

Moderate Schwankungen sind erkennbar, die sich aber weder in Abhängigkeit von der Grösse der Basalfläche noch hinsichtlich der Testregionen oder Neigungsklassen unterscheiden. Eine Anpassung der korrekten Werte als Funktion der LFI-Schätzwerte wurde sowohl für die Basalfläche als auch die Stammzahl durchgeführt und führte zu folgenden Regressionsfunktionen:

wahre Basalfläche = $1,45 + 0,986$ Basalfläche LFI, mit $r^2 = 0,94$
 wahre Stammzahl = $18,89 + 0,988$ Stammzahl LFI, mit $r^2 = 0,97$

Beide Regressionsmodelle sind signifikant: Die hohen Bestimmtheitsmassen deuten auf einen straffen Zusammenhang zwischen den wahren Werten und den im LFI ermittelten Werten. Die Schnittpunkte der Regressionsgeraden mit der y-Achse deuten auf eine leichte Unterschätzung der LFI-Werte hin, waren aber nicht signifikant.

4.2 Prozentuale Verzerrung

Während in den *Abbildungen 4 bis 7* die absoluten Schätzwerte aufgetragen sind, erfolgen jetzt die Darstellung und Diskussion der prozentualen Werte. Hierbei wurde die relative Differenz berechnet, indem die Differenz zwischen den Schätzwerten nach LFI und den wahren Werten in Relation zu den wahren Werten gesetzt wurden. In den *Abbildungen 8 bis 11* finden sich Darstellungen, die analog zu den Darstellungen der Absolutwerte sind. Die graphische Darstellung lässt keine systematischen Unterschiede der Abweichungen der nach der LFI-Methode ermittelten Schätzwerte und den wahren Werten erkennen. Dies gilt sowohl in Bezug auf die Ausprägung der Basalfläche bzw. Stammzahl als auch für die betrachteten Regionen und Neigungsklassen.

Bei der Betrachtung der Werte der graphischen Darstellungen in den *Abbildungen 8 bis 11* lässt sich nicht erkennen, ob sich die auf den einzelnen Probeflächen ermittelten Über- und

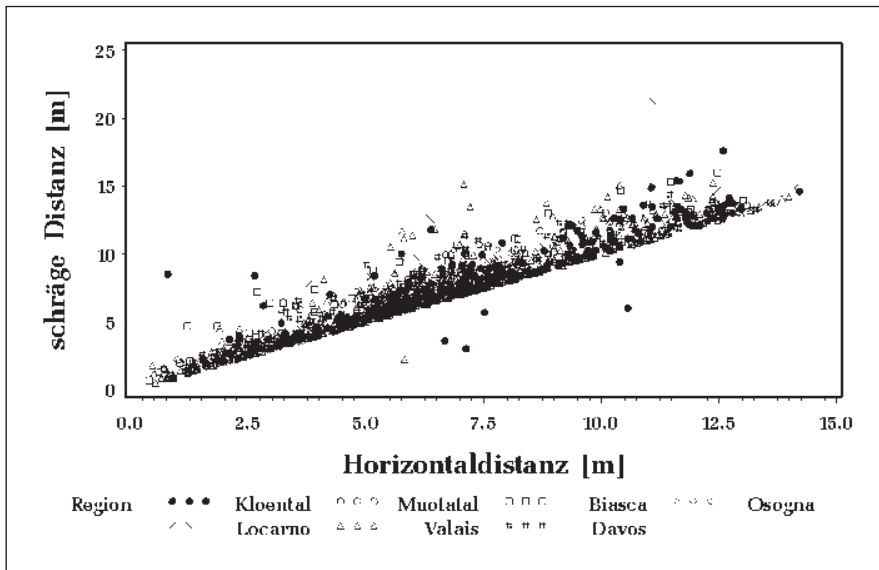


Abbildung 3: Horizontaldistanz versus schräge Distanz.

Figure 3: Horizontal versus inclined distance.

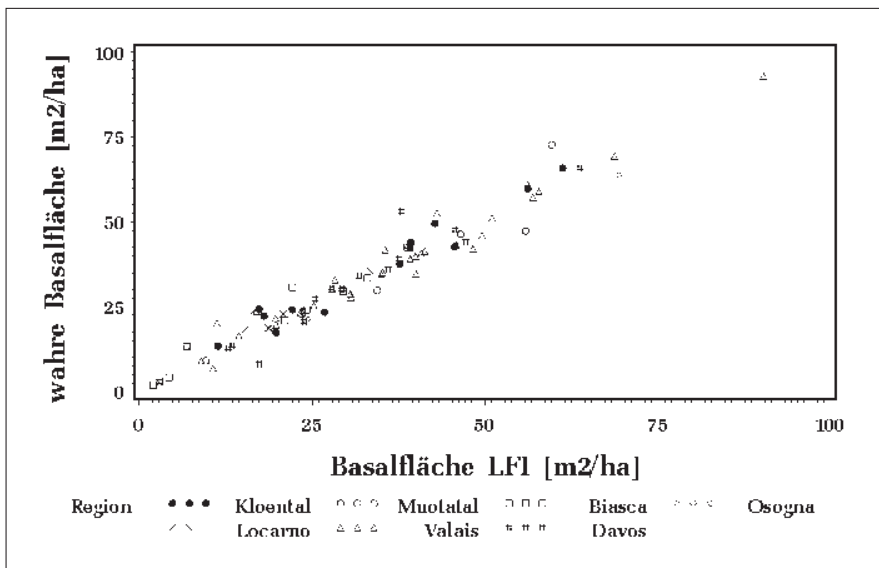


Abbildung 4: Basalfläche LFI versus wahre Basalfläche nach Region.

Figure 4: NFI basal area versus true basal area according to region.

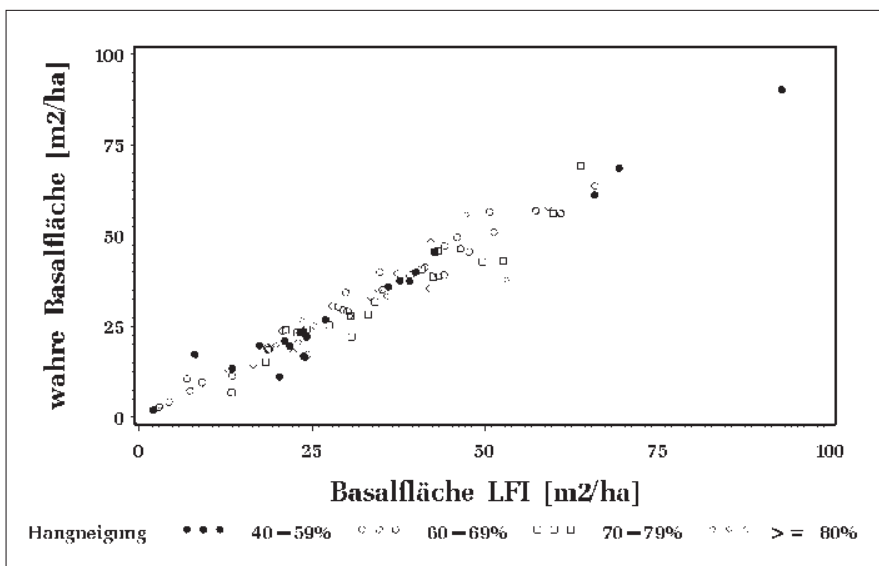


Abbildung 5: Basalfläche LFI versus wahre Basalfläche nach Neigungsklasse.

Figure 5: NFI basal area versus true basal area according to slope class.

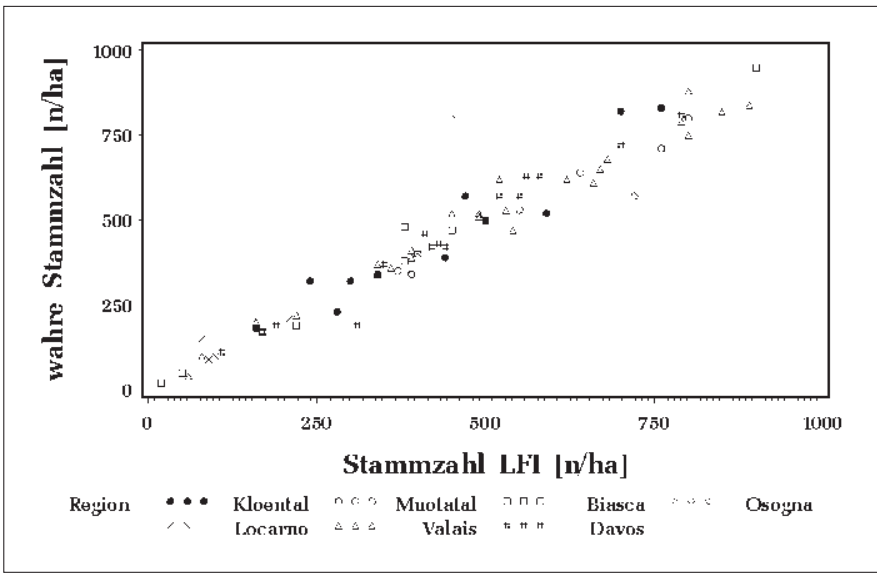


Abbildung 6: Stammzahl LFI versus wahre Stammzahl nach Region.

Figure 6: NFI density of stems versus true density of stems according to region.

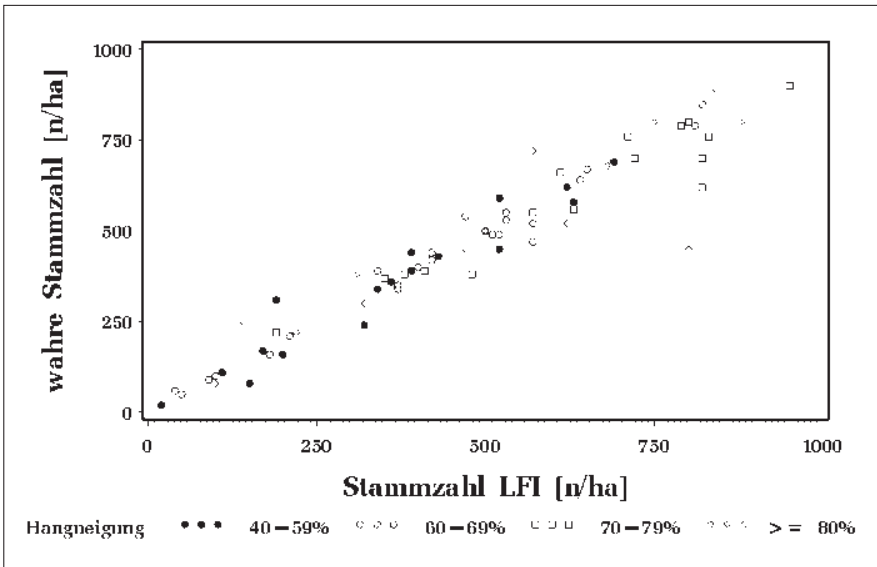


Abbildung 7: Stammzahl LFI versus wahre Stammzahl nach Neigungsklasse.

Figure 7: NFI density of stems versus true density of stems according to slope class.

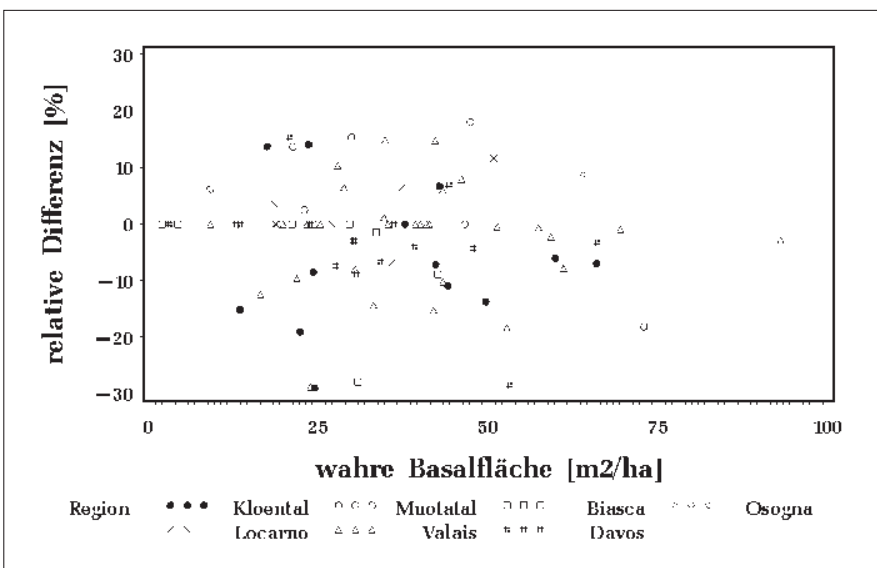


Abbildung 8: Relative Differenz der Basalfläche versus wahre Basalfläche nach Region.

Figure 8: Relative difference between NFI and true basal areas according to region.

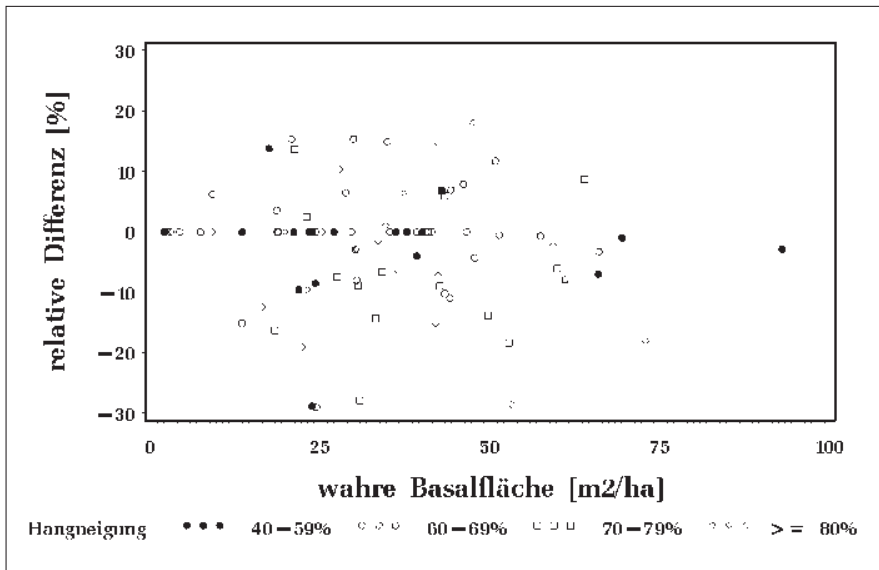


Abbildung 9: Relative Differenz der Basalfläche versus wahre Basalfläche nach Neigungsklasse.

Figure 9: Relative difference between NFI and true basal areas according to slope class.

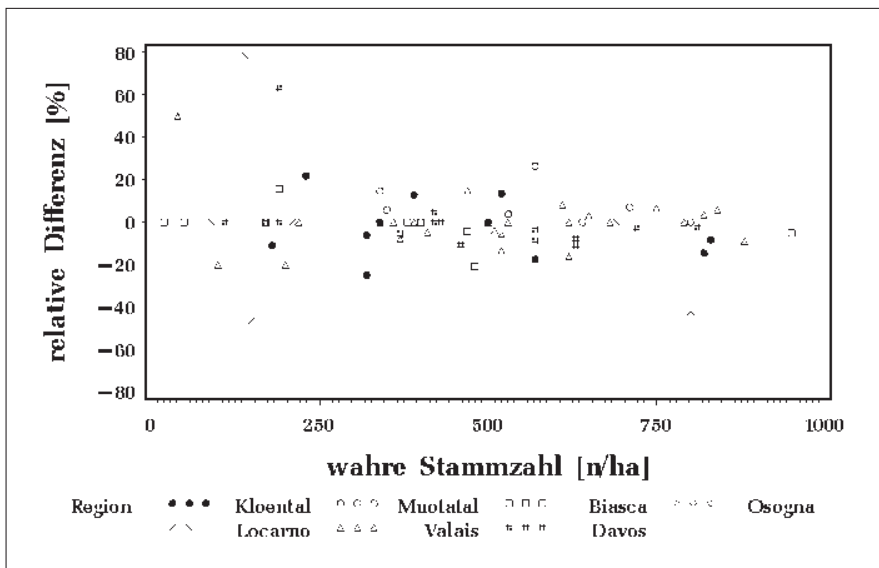


Abbildung 10: Relative Differenz der Stammzahl versus wahre Stammzahl nach Region.

Figure 10: Relative difference between NFI and true density of stems according to region.

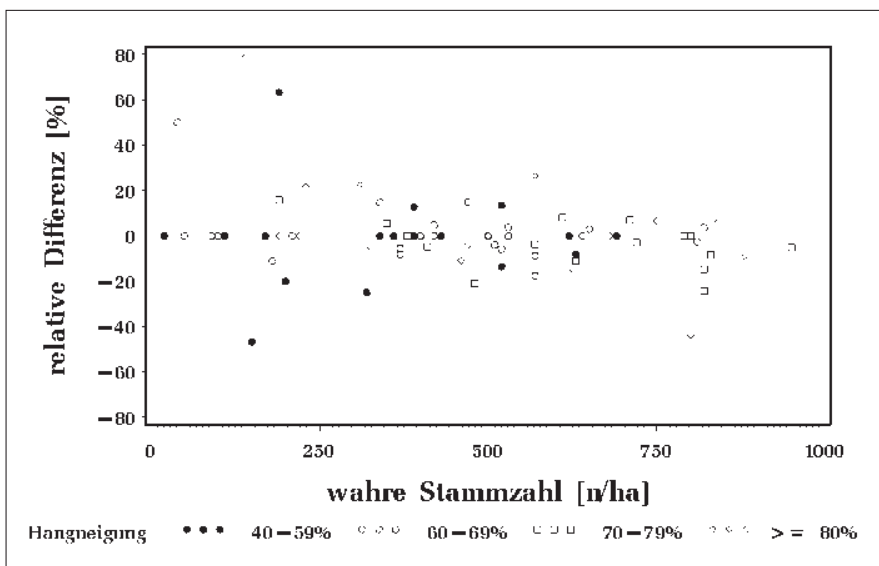


Abbildung 11: Relative Differenz der Stammzahl versus wahre Stammzahl nach Neigungsklasse.

Figure 11: Relative difference between NFI and true density of stems according to slope class.

Hangneigung		Wahre Basalfläche [m ² /ha]	Basalfläche LFI [m ² /ha]	Differenz (Basalfläche LFI–wahre Basalfläche) [m ² /ha]	Basalfläche LFI in % von wahrer Basalfläche
Klöntal	\bar{X}	33,65	35,94	2,29	106,81
	$s\bar{X}$	4,35	4,58	0,97	
Muotatal	\bar{X}	37,40	36,55	-0,85	97,73
	$s\bar{X}$	6,17	7,06	2,23	
Biasca	\bar{X}	20,20	22,35	2,15	110,64
	$s\bar{X}$	4,37	4,53	1,11	
Osogna	\bar{X}	38,10	38,46	0,36	100,94
	$s\bar{X}$	-	-	-	
Locarno	\bar{X}	23,00	23,50	0,51	102,17
	$s\bar{X}$	4,21	3,77	0,93	
Valais	\bar{X}	36,91	37,89	0,98	102,66
	$s\bar{X}$	3,16	3,17	0,66	
Davos	\bar{X}	29,78	30,61	0,83	102,79
	$s\bar{X}$	3,53	4,01	1,14	
Gesamt	\bar{X}	31,81	32,82	1,01	103,18
	$s\bar{X}$	1,79	1,82	0,43	

Table 2: Durchschnittliche Basalfläche nach Regionen.

Table 2: Mean basal area by region.

Hangneigung		Wahre Basalfläche [m ² /ha]	Basalfläche LFI [m ² /ha]	Differenz (Basalfläche LFI–wahre Basalfläche) [m ² /ha]	Basalfläche LFI in % von wahrer Basalfläche
40–59%	\bar{X}	31,01	32,08	1,07	103,45
	$s\bar{X}$	4,61	4,70	0,85	
60–69%	\bar{X}	32,35	32,31	-0,04	99,88
	$s\bar{X}$	3,09	3,12	0,54	
70–79%	\bar{X}	33,99	36,17	2,17	106,41
	$s\bar{X}$	3,58	3,37	0,99	
>=80%	\bar{X}	30,09	31,57	1,48	104,92
	$s\bar{X}$	3,32	3,51	1,10	
Gesamt	\bar{X}	31,81	32,82	1,01	103,18
	$s\bar{X}$	1,79	1,82	0,43	

Table 3: Durchschnittliche Basalfläche nach Neigungsklassen.

Table 3: Mean basal area by slope class.

Hangneigung		Wahre Stammzahl [n/ha]	Stammzahl LFI [n/ha]	Differenz (Stammzahl LFI – wahre Stammzahl) [n/ha]	Stammzahl LFI in % von wahrer Stammzahl
40–59%	\bar{X}	550,95	562,38	11,43	102,07
	$s\bar{X}$	124,35	127,15	11,15	
60–69%	\bar{X}	574,19	572,90	-1,29	99,78
	$s\bar{X}$	71,04	68,67	7,74	
70–79%	\bar{X}	651,67	679,44	27,78	104,26
	$s\bar{X}$	59,41	59,11	17,59	
>=80%	\bar{X}	622,17	639,13	16,96	102,73
	$s\bar{X}$	102,54	103,42	26,26	
Gesamt	\bar{X}	595,81	607,53	11,72	101,97
	$s\bar{X}$	45,51	45,68	8,11	

Table 4: Durchschnittliche Stammzahl nach Regionen

Table 4: Mean stem density by region.

Region		Wahre Stammzahl [n/ha]	Stammzahl LFI [n/ha]	Differenz (Stammzahl LFI – wahre Stammzahl) [n/ha]	Stammzahl LFI in % von wahrer Stammzahl
Klöntal	\bar{X}	528,46	558,46	30,00	105,68
	$s\bar{X}$	80,12	88,51	17,39	
Muotatal	\bar{X}	773,75	741,25	-32,50	95,80
	$s\bar{X}$	178,75	187,18	19,25	
Biasca	\bar{X}	330,00	345,56	15,56	104,72
	$s\bar{X}$	88,30	95,12	12,71	
Osogna	\bar{X}	855,00	970,00	115,00	113,45
	$s\bar{X}$	-	-	-	
Locarno	\bar{X}	611,67	606,67	-5,00	99,18
	$s\bar{X}$	170,64	166,32	25,98	
Valais	\bar{X}	707,50	711,88	4,38	100,62
	$s\bar{X}$	88,47	87,67	9,78	
Davos	\bar{X}	452,35	482,35	30,00	106,63
	$s\bar{X}$	46,77	61,04	22,36	
Gesamt	\bar{X}	595,81	607,53	11,72	101,97
	$s\bar{X}$	45,51	45,68	8,11	

Table 5: Geschätzte Stammzahl (Total) nach Neigungsklassen.

Table 5: Estimated stem density by slope class.

Unterschätzungen nach der LFI-Methode ausgleichen. In den *Tabellen 2 bis 5* sind die durchschnittlichen Basalflächen und Stammzahlen, wie sie im LFI geschätzt wurden, die entsprechenden wahren Werte sowie die absolute und prozentuale Differenz zwischen beiden angegeben. Bei der Interpretation der Tabellen ist zu beachten, dass die Anzahl Beobachtungen in den einzelnen Regionen stark schwankt. Daher wurde auch der Standardfehler der Mittelwerte angegeben. Die Werte der Region Osogna, in der lediglich zwei Probeflächen aufgenommen wurden, sind nur der Vollständigkeit halber angeführt.

Bis auf die Testregion Muotatal erfolgt im LFI eine Überschätzung der Basalflächen (*Tabelle 2*), was auch für die Betrachtung der Neigungsklassen gilt (*Tabelle 3*). Die maximale absolute Differenz zwischen der im LFI geschätzten Basalfläche und der wahren Basalfläche wird in der Region Biasca beobachtet und beträgt etwa 10%. Im Mittel überschätzt die LFI-Methode die wahren Werte um etwa 1 m²/ha oder 3%.

Die durchschnittliche Stammzahl wird durch die LFI-Methode im Mittel um rund 2% überschätzt (*Tabellen 4 und 5*). Auch hier findet in der Region Muotatal eine Unterschätzung statt. Die Unterschätzung in der Region Locarno ist mit weniger als 1% zu vernachlässigen. Die absolute Differenz liegt sowohl in den einzelnen Neigungsklassen als auch in den Regionen bei unter 7% mit Ausnahme der stark ausgeprägten Überschätzung in der Testregion Osogna. Hier ist der Unterschied mit über 13% zwar markant, aber aufgrund der geringen Probenzahl (n = 2) wenig aussagekräftig.

Trotz der Unterschiede, die bei der Basalfläche und der Stammzahl beobachtet werden, zeigen die Standardfehler, dass für sämtliche in den *Tabellen 2 bis 5* gebildeten Auswerteeinheiten die 95%-Vertrauensintervalle der Basalflächen- und Stammzahlschätzung der LFI-Methode in allen Fällen die Mittelwerte der korrekten Schätzung einschliessen. Damit kann die Zufälligkeit der Über- und Unterschätzung nicht ausgeschlossen werden; es wird aber deutlich, dass die Verzerrungen bei der Auswertung kleinerer Einheiten Grössenordnungen annehmen können, die nicht mehr zu vernachlässigen sind.

4.3 Abhängigkeit der Verzerrung von der Hangneigung

Die bisher gezeigten graphischen und tabellarischen Auswertungen lassen keine Abhängigkeit der Verzerrung durch die LFI-Methode bei der Stammzahl- und Basalflächenschätzung von der Hangneigung erkennen. Um dies zu verdeutlichen,

werden in den *Abbildungen 12 und 13* die prozentualen Abweichungen der LFI-Methode über der Hangneigung gezeigt. Bei den einzelnen Beobachtungen ist die Region angegeben.

Auch bei diesen beiden Darstellungen lässt sich kein Zusammenhang zwischen der Verzerrung und der Hangneigung erkennen. Allerdings zeigt sich, dass die Abweichungen der LFI-Schätzung vom korrekten Wert bei einzelnen Probeflächen sehr stark ausgeprägt sein können und Werte über 60% annehmen.

Als alternativen Ansatz zur Untersuchung des Einflusses der Hangneigung wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Bei den unter 4.1 beschriebenen Regressionsanalysen wurde die Hangneigung als unabhängige Variable neben den LFI-Werten in die Regressionsfunktionen eingeschlossen. Sie leistete allerdings keinen signifikanten Beitrag und musste daher als unabhängige Grösse aus den Regressionsfunktionen ausgeschlossen werden. Ebenso wurde versucht, die Unterschiede zwischen den wahren Werten und den LFI-Werten als Funktion der Hangneigung zu modellieren. Die ermittelten Regressionsfunktionen waren aber weder für die Basalfläche noch für die Stammzahl signifikant. Beide Ansätze belegen somit, dass für den Testdatensatz der Einfluss der Hangneigung auf den Unterschied zwischen den wahren Werten und den LFI-Werten nicht nachgewiesen werden konnte.

4.4 Statistische Signifikanztests

Neben der Berechnung der Vertrauensintervalle wurden die Daten der Untersuchung mit Hilfe statistischer Signifikanztests untersucht. Bei der Interpretation der Ergebnisse der statistischen Signifikanztests ist zu beachten, dass sie aufgrund der geringen Anzahl Beobachtungen in den Untereinheiten nur eine geringe Trennschärfe aufweisen, die bedeutungsrelevante Unterschiede teilweise nicht erkennen lassen (siehe hierzu auch KÖHL, 1990). Entscheidungen wurden daher auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,1$ getroffen. Eine Adjustierung für multiples Testen wurde nicht durchgeführt, weshalb die Ergebnisse im Sinne einer explorativen Datenanalyse interpretiert werden müssen.

Zur Beurteilung des Unterschieds der Beobachtungen für die beiden Attribute Basalfläche und Stammzahl wurde der paarweise t-Test angewendet. Die für diesen Test erforderliche Voraussetzung der Normalverteilung wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft. Waren die Werte nicht normalverteilt, wurde der Wilcoxon-Test (Wilcoxon signed-rank test)

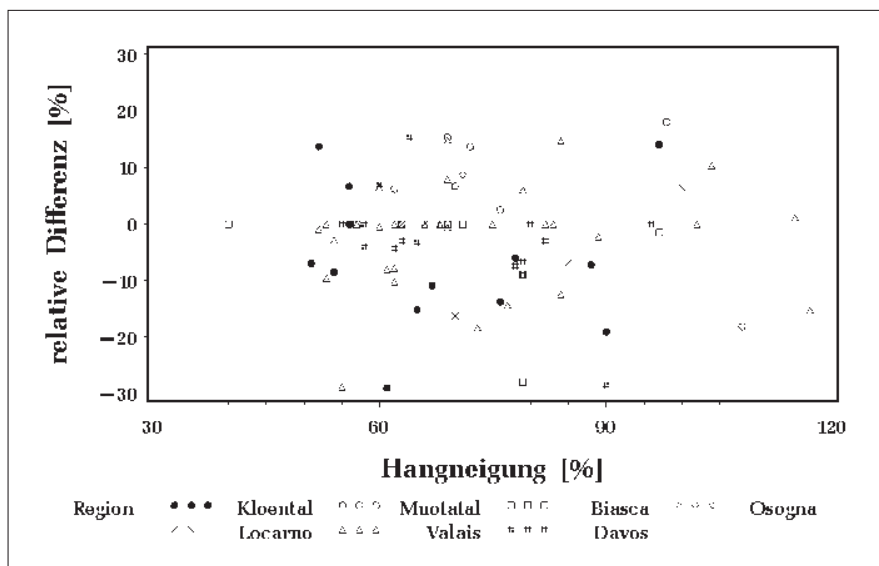


Abbildung 12: Relative Differenz der Basalflächenschätzung in Bezug auf die Hangneigung.

Figure 12: Relative difference of the basal area as a function of slope.

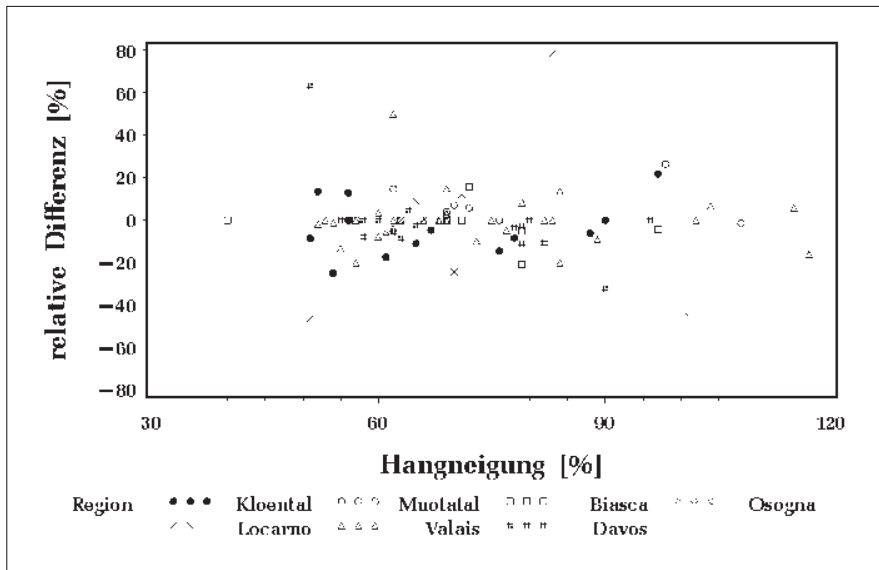


Abbildung 13: Relative Differenz der Stammzahlschätzung in Bezug auf die Hangneigung.

Figure 13: Relative difference of the stem density as a function of slope.

durchgeführt. Dieser Test hat allerdings bei geringem Stichprobenumfang ($n < 30$) eine geringere Trennschärfe als der paarweise t-Test.

Eine Überprüfung der LFI-Werte und der wahren Werte durch den paarweisen t-Test bzw. den Wilcoxon-Test führen nur für zwei Untereinheiten zu signifikanten Ergebnissen:

- (1) In der Testregion Klöntal werden sowohl bei der Basalflächenschätzung als auch bei der Stammzahlschätzung signifikante Unterschiede zwischen den wahren Werten und den LFI-Werten gefunden.
- (2) Bei der Neigungsklasse 70 bis 80% finden sich entsprechende signifikante Unterschiede für die Schätzung der Basalfläche. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass durch den Verzicht auf eine Adjustierung für multiples Testen das gewählte Signifikanzniveau von 10% eine 68%-Chance besteht, dass mindestens einer der elf durchgeführten Tests fälschlicherweise zu einem signifikanten Unterschied führt.

5. Diskussion und Schlussfolgerungen

In dieser Studie werden die im LFI angewendeten Methoden zur Korrektur der Aufnahmewahrscheinlichkeiten von Einzelbäumen in geneigtem Gelände untersucht. Hierzu wurden die mit der LFI-Methode ermittelten Resultate mit durch die Auslegung einer Ellipse am Hang gewonnenen Resultaten verglichen. Die Ausführungen beziehen sich auf die beiden Attribute Stammzahl und Basalfläche, können aber auf den Vorrat und andere quantitative und qualitative Merkmale übertragen werden. Der Vergleich zeigt, dass die LFI-Methode zu Resultaten führt, die in einem weiten Bereich um die wahren Werte schwanken. Sowohl Über- als auch Unterschätzung der wahren Werte ist durch die LFI-Methode möglich, wobei Abweichungen von über 60% festgestellt wurden.

Bei der Zusammenfassung mehrerer Probeflächenwerte zu Aussagen für Untereinheiten erfolgt nicht immer ein vollständiger Ausgleich. Während bei einer Auswertung über alle im Testdatensatz enthaltenen Probeflächen ($n = 93$) die LFI-Methode bei den beiden betrachteten Attributen Stammzahl und Grundfläche zu einer Überschätzung der wahren Werte um etwa 2 bzw. 3% führt, kann sich die Verzerrung bei kleineren Untereinheiten wesentlich stärker auswirken.

Die durchgeführten Signifikanztests führten nur für wenige Untereinheiten zu signifikanten Unterschieden. Auch wenn diese Ergebnisse zunächst beruhigend erscheinen, zeigen sie doch, dass die im LFI gewählte Methode zu verzerrten Ergebnissen führen kann. Dies gilt um so mehr, als in den meis-

ten Fällen die Differenzen nicht normalverteilt waren und somit der nicht sehr trennscharfe Wilcoxon-Test gewählt werden musste. Auch die geringe Anzahl von Beobachtungen erfordert eine Effektgrösse (= kleinster signifikanter Unterschied) in einer Grössenordnung, die deutlich über einer für Inventurauswertungen relevanten Dimension liegt.

Ein Zusammenhang der Grösse der Abweichungen mit der Hangneigung konnte nicht festgestellt werden. Die Aufnahmeanweisung zur Bestimmung der Hangneigung und damit der Festlegung des korrigierten, schrägen Probeflächenradius führt somit zu keiner einseitigen Überschätzung der Hangneigung und damit sämtlicher Probeflächenattribute. Die zunächst naheliegende Vermutung, dass die LFI-Aufnahmeanweisung proportional zur Hangneigung zu einer zu hohen Auswahl von Bäumen führt, konnte somit nicht bestätigt werden. Die Abweichung vom wahren Wert schwankt unabhängig von der Hangneigung, was verschiedene (hypothetische) Gründe haben kann. Eine Ursache für Abweichungen kann bei der Aufnahme durch die Feldequipen liegen: Der Einfluss des Kleinreliefs auf die Festlegung der Hangneigung kann einen subjektiven Beobachtereinfluss bewirken, der zwischen einzelnen Feldaufnahmeequipen verschieden stark und mit verschiedenem Vorzeichen ausgeprägt sein kann. Eine andere Begründung wäre die unzureichende praktische Eignung der Hangneigungskorrektur durch Anpassung des schrägen Probeflächenradius in extrem geneigtem Gelände.

Einfluss auf die Ergebnisse kann allerdings auch die mögliche Anisotropie der räumlichen Verteilung der Bäume in Steillagen haben. Die Abstände zwischen benachbarten Bäumen in der Falllinie könnten kürzer sein als zwischen Bäumen, die parallel zum Hang stehen. Sowohl die korrigierten, schrägen Probekreisradien als auch Ellipsen am Hang führen theoretisch zu gleich grossen Aufnahmeflächen. Unterstellt man allerdings Anisotropie, werden auf dem Sektor, der von Probekreisradien, nicht aber von Ellipsen aufgenommen wird (Sektor «vom LFI fälschlicherweise erfasst» in *Abbildung 2*), weniger Bäume erfasst, da die Stammabstände quer zum Hang grösser sind als in der Falllinie. Bäume, die von der Ellipse, nicht aber vom korrigierten Probekreis aufgenommen werden (Sektor «vom LFI fälschlicherweise nicht erfasst» in *Abbildung 2*), haben geringere Abstände, da sie in der Falllinie stehen (*Abbildung 14*). Da Stammabstände aber auch von anderen Faktoren, wie zum Beispiel der Bewirtschaftung oder kleinstandörtlichen Unterschieden abhängen, wären die Abweichungen zwischen LFI-Methode und korrekter Methode auch mit diesem Gedankenmodell zu erklären.

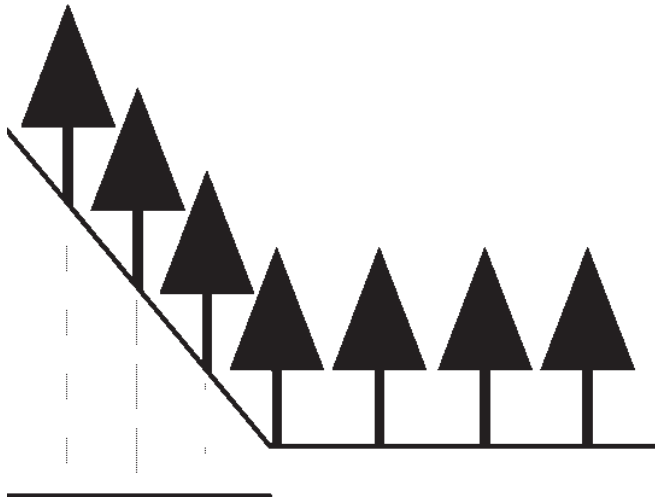


Abbildung 14: Anisotropie am Hang.

Figure 14: Anisotropy in the inclined plane.

Wie gezeigt wurde, gleichen sich die durch die LFI-Methode zur Hangkorrektur bedingten Über- und Unterschätzungen nicht vollständig aus, sondern führen zu Verzerrungen. Die Bedeutung von einseitigen Verzerrungen auf die Ergebnisse des LFI sollte nicht unterschätzt werden. Sie können durch eine Erhöhung des Stichprobenumfangs nicht ausgeglichen werden. Bei der Untersuchung von verschiedenen Fehlerquellen auf die Zuverlässigkeit der Volumenschätzung im LFI haben GERTNER und KÖHL (1992) mit Hilfe von Fehlerbudgets gezeigt, dass bereits eine geringe einseitige Verzerrung bei der Bestimmung der Hangneigung um 1% deutliche Auswirkungen auf die Vorratsschätzung haben kann.

Methodische Änderungen sollten bei permanenten Inventuren nicht ohne zwingenden Grund durchgeführt werden. Eine unbestrittene Notwendigkeit zu methodischen Veränderungen ergibt sich bei Aufnahmemethoden, die zu systematischen Fehlern führen. Die Ergebnisse der hier gezeigten Studie legen in Verbindung mit im Rahmen des LFI durchgeführten Sensitivitätsanalysen (GERTNER und KÖHL, 1992) eine Änderung der Aufnahmemethode im LFI nahe. In der Inventurpraxis ist die Aufnahme von Ellipsen in geneigtem Gelände in vielen Ländern realisiert und hat sich auch in Steillagen bewährt (Kennel, Schöpfer, Hradetzky, Scott, Schieler, alle mündlich). Mobile Datenerfassungsgeräte können um Funktionen für Grenzbaumentscheide in Abhängigkeit von der schrägen Entfernung und der Distanz erweitert werden, so dass in Verbindung mit elektronischen Entfernungsmessern Ellipsen einfach und kosteneffizient aufgenommen werden können. Der Übergang zu einer neuen Aufnahmemethode am Hang würde allerdings zur Folge haben, dass ein (geringer) Teil der LFI-Probepflanzen nicht mehr erfasst würde (Sektor «vom LFI fälschlicherweise erfasst» in *Abbildung 2*) und durch neue Probepflanzen (Sektor «vom LFI fälschlicherweise nicht erfasst» in *Abbildung 2*) ersetzt werden muss. Die Forderung nach abhängigen Beobachtungen wäre damit teilweise nicht mehr erfüllt. Für die Schätzung von Veränderungen stünden aber immer noch genügend permanente Probepflanzen zur Verfügung.

Für die Vorbereitungen des dritten LFI müssen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung berücksichtigt und bewertet werden. Eine geringfügig verzerrte Schätzung der Basalfläche, des Vorrats und der Stammzahl muss den Zielen und Zielgrößen der dritten Inventur sowie den Aufnahmekosten gegenübergestellt werden. Von Seiten der Nutzer der LFI-Resultate wäre zu erfragen, ob die hier beschriebenen Verzerrungen tatsächlich Dimensionen annehmen, die für die Interpretation der LFI-Resultate bedeutungsrelevant sind.

Zusammenfassung

Die Notwendigkeit, sämtliche Ergebnisse, die bei Forstinventuren in geneigtem Gelände erhoben werden, auf die Horizontalfäche zu beziehen, erfordert eine Korrektur der Aufnahmeflächen. Da Kreisflächen bei der Projektion auf eine geneigte Fläche zu Ellipsen werden, ist die Aufnahme von ellipsenförmigen Aufnahmeflächen in geneigtem Gelände die korrekte Methode. Aus Gründen der Praktikabilität werden bei Forstinventuren häufig alternative Verfahren angewendet. Im Landesforstinventar (LFI) wird der Radius der kreisförmigen Probestfläche in geneigtem Gelände vergrössert, so dass die aufgenommene Kreisfläche gleich gross ist wie die Fläche der entsprechenden projizierten Ellipse einer horizontalen Kreisfläche. Damit werden nur in den Bereichen, in denen sich die (korrekte) Ellipse und die vergrösserte Kreisfläche überdecken dieselben Bäume ausgewählt; die Ellipse führt zu einer stärkeren Auswahl von Bäumen in der Hangrichtung, die Kreisfläche zur Auswahl von Bäumen parallel zum Hang.

In der hier vorgestellten Studie wird an einer Stichprobe von 93 LFI-Proben untersucht, ob die unterschiedliche Auswahl von Bäumen zu verzerrten Ergebnissen führen kann. Dieses Problem könnte besonders in der Schweiz von Bedeutung sein, da rund 20% der LFI-Proben in Gebieten mit über 40% Hangneigung liegen.

Im Mittel der untersuchten Flächen konnte eine Abweichung der LFI-Schätzwerte von den wahren Werten für die Basalfläche und die Stammzahl um 2% gefunden werden. Für kleine Aussageeinheiten sind möglicherweise grössere Verzerrungen zu erwarten.

Summary

Investigation of the effect of the slope correction method as applied in the Swiss National Forest Inventory of estimates

All results obtained by forest inventories must be related to a horizontal surface; thus the slope correction of sample plot areas is necessary. Since a circular sample plot becomes an ellipse when projected onto the inclined plane, the correct method is to select elliptical areas on a slope. For practical reasons, however, alternative slope correction methods are applied. In the Swiss National Forest Inventory, the radius of the circular sample area on a slope is increased so that the area is as large as the area of the perspective projected ellipse of a horizontal circular area. Thus, the same trees are selected only in areas in which the ellipse and the enlarged circular area overlap; the ellipse results in the selection of more trees in the direction of the slope, while the circular area leads to the selection of trees parallel to the slope.

In this study, 93 NFI plots were assessed by both the increased circle and the ellipse method. The results were used to determine whether the different method of selecting trees can lead to a distortion of the results. This problem may be meaningful for Swiss conditions, because roughly 20% of the plots are located in terrain with slopes larger than 40%.

For the plots in this study, a difference of 2% was found between the NFI estimates and the actual values. For smaller units of reference, the difference may lead to a greater distortion of the results.

Résumé

Importance de la correction de pente sur l'estimation dans l'inventaire forestier national suisse

La nécessité de rapporter à la surface horizontale les résultats des relevés d'inventaires forestiers implique une correction des surfaces d'échantillonnage sur les terrains en pente. Étant

donné que les placettes circulaires prennent la forme d'une ellipse lorsqu'elles sont projetées sur une surface inclinée, cette forme elliptique devrait être donnée aux placettes des terrains en pente. Afin de faciliter le travail, d'autres méthodes, plus pratiques, sont souvent utilisées dans les inventaires forestiers. Lors de l'inventaire forestier national (IFN), le rayon des placettes circulaires a été agrandi sur les terrains en pente afin que la surface relevée soit aussi grande que celle de l'ellipse par projection d'un cercle à l'horizontale. En conséquence, les mêmes arbres ne sont sélectionnés que dans les zones où l'ellipse (correcte) et le cercle agrandi se recourent. Les ellipses ont pour effet d'augmenter le nombre d'arbres sélectionnés dans la ligne de pente tandis que les cercles entraînent cette augmentation parmi les arbres parallèles à la pente.

Au cours de cette étude, nous avons cherché à savoir, sur un échantillon de 93 placettes de l'IFN, si une sélection différente peut fausser les résultats. Cette question ne manque pas d'importance, notamment en Suisse, car 20% au moins des échantillons de l'IFN se trouvent sur des pentes inclinées à plus de 40%.

En moyenne, sur l'échantillon examiné, un écart de 2% a été constaté entre les valeurs estimées par l'IFN et les valeurs réelles de la surface terrière et du nombre de tiges. Pour des unités d'interprétation plus petites, ce biais pourrait donc être plus large.

Literaturverzeichnis

- EAFV (1988): Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982-1986, Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Bericht 305, 375 S.
- GERTNER, G., KÖHL, M. (1992): An assessment of some non-sampling errors in a national survey using an error budget, *Forest Science*, Vol. 38, 3: 525–538.
- KÖHL, M. (1990): Sind «statistisch signifikante» Ergebnisse wirklich signifikant? oder: Gedanken zur Anwendung statistischer Methoden in der Forstlichen Forschung, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 161 (12): 222–231.
- KRAMER, H., AKCA, A. (1982): Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur, Sauerländer, Frankfurt a. M., 251 S.
- SCHMID-HAAS, P., WERNER, J., BAUMANN, E. (1978): Kontrollstichproben: Aufnahmeinstruktion. 2. Auflage, Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Bericht 186, 57 S.
- ZINGG, A. (1988): Schweizerisches Landesforstinventar: Anleitung für die Erstaufnahme, Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Bericht 304: 1–117.
- ZÖHRER, F. (1980): *Forstinventur*, Paul Parey, Hamburg, 207 S.

Dank

Wir danken den beiden Reviewern, Herrn Dr. Clemens Schadauer, FBVA Wien, und Herrn PD Dr. Daniel Mandallaz, D-FOWI, ETH Zürich, für die kritische Durchsicht des Manuskripts und ihre wertvollen Hinweise. Die Aufnahmen im Gelände wurden 1996 von Hanna Aho, Hanna Rasanen und Janne Laakkonen während ihres Praktikums an der WSL durchgeführt. Herrn Dr. Markus Keller, WSL, danken wir für die Organisation der Feldaufnahmen.

Verfasser:

Prof. Dr. MICHAEL KÖHL, Professor, Technische Universität Dresden, Professur für Biometrie und Forstliche Informatik, Piennnerstr. 8, D-01737 Tharandt.
Dr. PETER BRASSEL, Leiter Abteilung Landschaftsinventar, Eidg. Forschungsanstalt WSL, CH-8903 Birmensdorf.