

Auf dem Weg zum Gebirgsplechterwald: Kurzeffekte von Durchforstungen auf die Struktur subalpiner Fichtenwälder¹ (reviewed paper)

HANSHEINRICH BACHOFEN und ANDREAS ZINGG

Keywords: Mountain selection forest; minimal tending operations; protective function; stand stability; stand structure; Switzerland. FDK 221.4 : 24 : 56 : (494)

Abstract: Stand structures and stand stability in unmanaged Norway spruce forests in the Swiss mountains may decline and their protective function against natural hazards will thus be put at risk. They are being subjected to thinning operations to improve stability and, in the long-term, to transform them into mountain selection forests. On pairs of research plots – thinned and not thinned – we will closely follow the stand development. Preliminary results indicate that the best variables to describe the effectiveness of the applied treatment to the stand structures are the h/d ratio, the spatial distribution and the stand density index.

Abstract: Bestandesstrukturen und Bestandesstabilität könnten sich in unbewirtschafteten Fichtenwäldern in den Alpen verschlechtern und ihre Schutzfunktion gegen Naturgefahren könnte daher vermindert werden. Die Wälder wurden Durchforstungen unterzogen, um die Stabilität zu verbessern und sie langfristig in Gebirgsplechterwälder zu überführen. In Versuchsflächen – durchforstet und nicht durchforstet – wird die Bestandesentwicklung untersucht. Erste Ergebnisse deuten an, dass die besten Variablen, um die Wirksamkeit der angewandten Behandlung bei den Bestandesstrukturen zu beschreiben, der Schlankheitsgrad (h/d-Wert), die Horizontalverteilung der Bäume und die Bestandesdichte sind.

1. Einleitung

Ein grosser Teil der Schutzwälder in den Alpen liegt in der oberen montanen und der subalpinen Vegetationshöhenstufe. Dabei handelt es sich vorwiegend um Fichten-Tannen-Wälder, subalpine Fichtenwälder und im inneralpinen Bereich um Wälder mit Lärche und Arve. Schutzwälder im oberen montanen und subalpinen Bereich aus Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) sollen nach heutigen Vorstellungen ungleichförmig, ungleichaltrig, vertikal und horizontal, in so genannte Rotten, d.h. mit gruppenweise angeordneten Bäumen, strukturiert sein; ausserdem soll dauernd eine gut verteilte, lebensfähige Verjüngung vorhanden sein (OTT *et al.* 1997). Solche Wälder werden als stabil betrachtet, d.h. am ehesten widerstandsfähig gegen Sturm und Schneedruck, und sollten damit die an sie gestellten Ansprüche bezüglich Schutzwirkung permanent erfüllen können. Solche Strukturen kommen im Laufe einer Bestandesentwicklung auch unter natürlichen Bedingungen vor (HILLGARTER 1971, KORPEL' 1995). Sie können sich aus unregelmässigen Verjüngungen oder als Folge kleinerer Schadenereignisse, z.B. durch Schneebruch entwickeln. Ohne solche Ereignisse können sich solche Zustände durch das Durchmesser- und Höhenwachstum und die daraus resultierende Konkurrenz zu gleichförmigen, regelmässigen Bestandesstrukturen entwickeln, die dann nicht mehr als stabil betrachtet werden. Im Gebirgswaldbau wird nun versucht, diese Strukturen, dort wo sie schon vorhanden sind, zu erhalten und dort, wo sie noch nicht vorhanden sind, zu schaffen, auch wenn dazu wahrscheinlich relativ lange Zeiträume notwendig sind (BRANG *et al.* 2004).

In den Schweizer Alpen gibt es viele Fichtenbestände, die seit langem nicht mehr bewirtschaftet wurden. An Hängen, die früher durch Rodung, Kahlschlag, Waldbrand oder Sturmereignisse zeitweise baumlos wurden, stehen heute gleichförmige Fichtenbestände. An anderen Standorten führte eine früher intensiv betriebene und dann später aufgegebenen Waldweide zu überdichten, ebenfalls homogenen Beständen. Dasselbe gilt für viele Aufforstungen. Hochmontane Fichtenbestände auf gleichmässigen Hängen mit kleinen Standortsunterschieden haben aber auch von Natur aus die Tendenz zur Gleichförmigkeit (OTT *et al.* 1997). Wenn diese Bestände wei-

terhin ohne Durchforstungen sich selbst überlassen werden, dürfte sich ihre Struktur verschlechtern – das bedeutet höhere Schlankheitsgrade, kürzere Kronen usw. – und als Konsequenz davon die mechanische Stabilität, d.h. die Widerstandskraft gegen Stürme und Schneelast, zurückgehen. «Über grosse Flächen scheinen unsere Wälder von der Optimalphase in eine Terminal- und Zerfallsphase überzugehen» (SANDRI 1993). Die Wirksamkeit als Schutz gegen Naturgefahren könnte damit zurückgehen (z. B. FREY 1977, BISCHOFF 1987). Nach Untersuchungen von MEYER-GRASS (1986), IMBECK (1987) und FIEBIGER (1978) können z.B. reine Bestände mit mangelhaftem vertikalem und horizontalem Bestandesschluss nur ungenügend gegen Waldlawinen schützen. Kritisch ist auch jede stärkere Auflichtung und Senkung des Kronenschlusses auf unter 60%. Geringe Stammzahlen in überalterten Beständen mit fehlendem oder ungenügend individuenreichem, vitalem Nebenbestand verstärken die Gefährdung ebenso wie die ungenügende Verjüngungsfähigkeit des Bestandes.

Nur zur Walderhaltung, ohne Holznutzung, wären Massnahmen der Stabilitätspflege in noch einigermaßen ursprünglichen Naturwäldern keineswegs allgemein notwendig. Dort aber, wo es wichtig ist, dass der Wald seine Schutzfunktion erfüllen kann, müssen auch Bestände, die momentan als stabil gelten, zumindest kontinuierlich beobachtet werden (OTT *et al.* 1997). Nach Frey² sind die entscheidenden Fragen im Zusammenhang mit Naturgefahren, welche Objekte gefährdet sind und ob sie permanenten Schutz brauchen. Für jeden Standort ist abzuschätzen, ob eine zeitlich eingeschränkte Reduktion des Schutzes akzeptiert werden kann, dies unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit eines Schadenereignisses und von Folgeschäden, z.B. der Erweiterung bereits bestehender Lücken in einem Bestand. Das Ergebnis dieser Abschätzung hat ganz direkte Rückwirkungen auf die Anforderungen, die an einen Wald im Entstehungs- und Transitgebiet von Naturgefahren gestellt werden müssen.

¹ Überarbeitete Fassung von BACHOFEN & ZINGG 2001.

² W. Frey, Eidg. Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF, Davos, mündliche Mitteilung, 1999.

Tabelle 1: Bestandesdaten (Hektarwerte).

In der zweiten Zeile pro Versuchsfläche sind die Daten zum Totholz (stehend und liegend) wiedergegeben. Das Totholz wurde in den behandelten Teilflächen mit der Nutzung entfernt T = Jahr (Vegetationsjahr) der Aufnahme und des Eingriffes. Für die Definition der Symbole siehe *Tabelle 2*.

Table 1: Stand data (values per hectare).

In the second line of each plot, data of dead trees (standing and laying) are shown. Deadwood was removed with harvesting. T = year (vegetation year) of survey and thinning. For a definition of the symbols see explanation in table 2.

Versuchsfläche	Verbleibender Bestand												Nutzung / Totholz					
	Flächen- grösse	T	Alter	N	h _{dom}	d _{dom}	h/d _{dom}	h _g	d _g	h/d _g	G	V ₇	N	h _g	d _g	h/d _g	G	V ₇
	ha	a	a		m	cm		m	cm		m ² ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹		m	cm		m ² ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
Plasselb 01	0,25	1993	57	1235	22,3	35,0	64	20,1	24,0	83	56,1	568	890 766	17,5	17,2	102	30,7 7,7	302 58
Plasselb 09	0,11	1993	57	2480	23,8	35,0	68	21,2	22,3	95	96,9	1054	– 688	16,0	11,7	137	7,4	61
Triesenberg 01	0,59	1996	60	1235	26,9	39,3	69	22,9	25,7	89	64,2	750	297 548	18,6	17,7	105	12,2 8,6	136 77
Triesenberg 02	0,60	1998	62	1279	27,3	39,9	69	23,4	25,7	91	66,2	787	153 502	19,4	17,9	109	7,6 8,8	90 84
Triesenberg 09	0,31	1996	60	1384	26,8	37,7	71	23,4	24,6	95	65,7	786	– 544	18,1	14,7	123	9,2	91
Elm 01	0,21	1993	73	1241	24,2	36,0	67	21,5	25,1	85	61,4	667	438 136	20,0	21,4	94	18,3 2,4	193 22
Elm 09	0,18	1993	73	1379	27,3	41,4	66	23,7	26,8	88	77,7	925	– 341	18,6	16,7	112	7,5	77
Siat 01	0,58	1998	140	681	27,7	41,1	68	24,2	28,5	85	43,5	526	186 219	20,3	20,3	100	8,7 4,4	100 43
Siat 09	0,50	1998	140	850	28,4	45,2	63	23,8	27,9	85	51,8	623	– 226	13,8	12,7	109	2,9	24
Tujetsch	1,07	1992	–	439	22,4	53,9	42	20,5	35,3	58	43,0	416	– 24	16,8	20,3	83	0,8	7
Sigriswil 01	1,52	1997	–	359	30,8	49,6	63	23,8	30,5	78	26,2	311	21 10	31,2	49,8	63	5,6 0,5	69 6
Sigriswil 02	0,49	1997	–	249	29,8	47,0	64	25,2	34,0	74	22,6	271	26 27	28,9	43,0	67	5,9 1,8	77 21

In vielen Fällen sind Durchforstungen nötig, um die gewünschten Strukturen zu erreichen, zu verbessern und zu erhalten. Waldbauliche Massnahmen zielen deshalb darauf ab, die Bestände allmählich, je nach dem Anfangszustand über einen mittleren (20 bis 50 Jahre) bis längeren Zeitraum (50 bis 150 Jahre), durch mehrere Eingriffe von gleichförmigen Wäldern in ungleichförmige «Gebirgsplenterwälder» umzuwandeln. Dazu muss auch durch das Entfernen einzelner Bäume oder Baumgruppen die Verjüngung in Lücken eingeleitet und gefördert werden. Als Folge davon sollte sich die Durchmesser- und Altersverteilung allmählich derjenigen eines Plenterwaldes im Gleichgewicht annähern (SCHÜTZ 1997, BACHOFEN 1999), ähnlich der Struktur der «mehrschichtigen Optimalphase» im Urwald Scatlè (BACHOFEN & ZINGG 1999 und 2001, Abbildung 9b in HILLGARTER 1971). Dieses Vorgehen ist vom Konzept her klar, doch im Gegensatz zur Überführung in Fichten-Tannen-Buchenwäldern (SCHÜTZ 2001, SCHÜTZ & RÖHNISCH 2003) in Fichtenwäldern praktisch noch wenig erprobt. Es stellt sich daher die Frage, ob es tatsächlich möglich ist, dicht stehende Fichtenbestände mit regelmässig verteilten, kurz-kronigen Bäumen mit Durchforstungen so zu verändern, dass sie sich der Zielvorstellung «Gebirgsplenterwald» annähern. Die Entwicklung, die sich aus den Durchforstungen ergibt, kann mit Kontrollflächen verfolgt werden. Hier sind Langfristbeobachtungen nötig.

Zwischen 1993 und 1998 wurden in Zusammenarbeit mit den lokalen Forstdiensten vier neue Langfrist-Beobachtungsflächen in subalpinen Fichtenbeständen in den Schweizer Alpen angelegt. In diesen Beständen in verschiedenen Ent-

wicklungsphasen wurde eine erste Erhebung mit besonderem Augenmerk auf der Struktur durchgeführt. In diesem Aufsatz stellen wir die Strukturveränderungen infolge des ersten waldbaulichen Eingriffs dar. Dabei wird die Bestandesstruktur mit Parametern zur Beschreibung der räumlichen Verteilung der Bäume, der Bestandesdichte, der Stammformen (h/d-Verhältnis), Kronenlängen und der Homogenität des Bestandes, in Abhängigkeit von der Art und Stärke des Eingriffs, beschrieben.

2. Material und Methoden

Unter den vier Versuchsflächen sind drei Aufforstungen von 1920 bis 1935 in Plasselb, Triesenberg und Elm, die nie durchforstet bzw. in denen nur Zwangsnutzungen durchgeführt wurden. Der Fichtenanteil (Grundfläche G) beträgt 95 bis 100%, der Deckungsgrad der Oberschicht 90 bis 100%. Auf der vierten Versuchsfläche in Siat steht ein Baumholz (100% Fichte, 60% Deckungsgrad), das etwa 1858 wahrscheinlich aus Naturverjüngung nach einer teilweisen Zerstörung des Vorbestandes durch Sturm oder Feuer entstanden ist und bereits Ansätze einer geklumpten, rottenartigen Baumverteilung aufweist.

Auf den vier Versuchsflächen wurden drei Arten von Eingriffen angewendet: In Plasselb, Elm und Triesenberg (Teilfläche 01) wurden Baumkollektive geformt. Dazu wurden Gruppen von 10 bis 20 Bäumen auf Flächen von ungefähr 200 m² gebildet, indem die Bäume zwischen diesen Gruppen entfernt wurden. Auf der Teilfläche Triesenberg 02 wurde in einer zu-

Tabelle 2: Erklärung der verwendeten Symbole nach SOEST et al. (1959).

Table 2: Explanation of symbols used according to SOEST et al. (1959).

Symbol	Dimension	Erklärung
T	A	Zeit = Jahr
Alter	A	Bestandesalter in Jahren
N	N ha ⁻¹	Stammzahl ha ⁻¹
d _{1,3}		Durchmesser in 1,3 m Höhe über Boden = Brusthöhendurchmesser
h _{dom}	m	Oberhöhe: Mittlere Höhe der 100 dicksten Bäume pro Hektare
d _{dom}	cm	Oberdurchmesser: Mittlerer d _{1,3} der 100 dicksten Bäume pro Hektare
h/d _{dom}		Verhältnis der mittleren Höhe zum mittleren Durchmesser der dominanten Bäume, d.h. der 100 dicksten Bäume ha ⁻¹
h _g	m	Höhe des Grundflächen-Mittelstammes
d _g	cm	Durchmesser des Grundflächen-Mittelstammes
h/d _g		Verhältnis von Höhe und Durchmesser des Grundflächen-Mittelstammes
G	m ² ha ⁻¹	Grundfläche ha ⁻¹ des Bestandes
V ₇	m ³ ha ⁻¹	Derbholzvolumen (Durchmesser ≤ 7cm) ha ⁻¹ des Bestandes

sätzlichen Variante versucht, einzelne Bäume als Gerüstbäume für die Stabilität zu fördern, entsprechend einer Auslese-durchforstung nach SCHÄDELIN (1934). Der Eingriff in Siat hatte zum Ziel, den Bestand stärker zu strukturieren, vor allem durch Freistellung der bereits vorhandenen, rottenartigen Gruppen und durch Förderung und Einleitung der Verjüngung, die nur spärlich vorhanden war. Zu jeder der vier Versuchsflächen gehört eine unmittelbar benachbarte, unbehandelte Kontrollfläche mit der Flächennummer 09.

Zwei weitere, seit längerer Zeit beobachtete Versuchsflächen, die bereits Strukturen aufweisen, die der Zielvorstellung Gebirgsplenterwald entsprechen, wurden als Vergleichsflächen ausgewählt: Sigriswil (zwei Teilflächen), ein gut aufgebauter Plenterwald mit zehn Aufnahmen seit 1925 (100% Fichte, 30% Deckungsgrad der Oberschicht) und Tujetsch, ein ungleichaltriger Bestand (Baumalter 60 bis 180 Jahre, 100% Fichte, 50% Deckungsgrad), wahrscheinlich aus einer Sukzession auf einer ehemaligen Weide entstanden, charakterisiert durch eine mosaikartige Verteilung von abwechslungsweise dicht bestockten Stellen (Rotten), Einzelbäumen und offenen Flächen, die von STROBEL (1997) beschrieben wurde. Einige dendrometrische Kennzahlen der Versuchsflächen sind in *Tabelle 1* zusammengestellt.

Alle Versuchsflächen liegen zwischen 1360 und 1760 m ü.M. an Hängen mit Neigungen zwischen 30 und 72% und Expositionen von E über SSW nach W. Der jährliche Nieder-

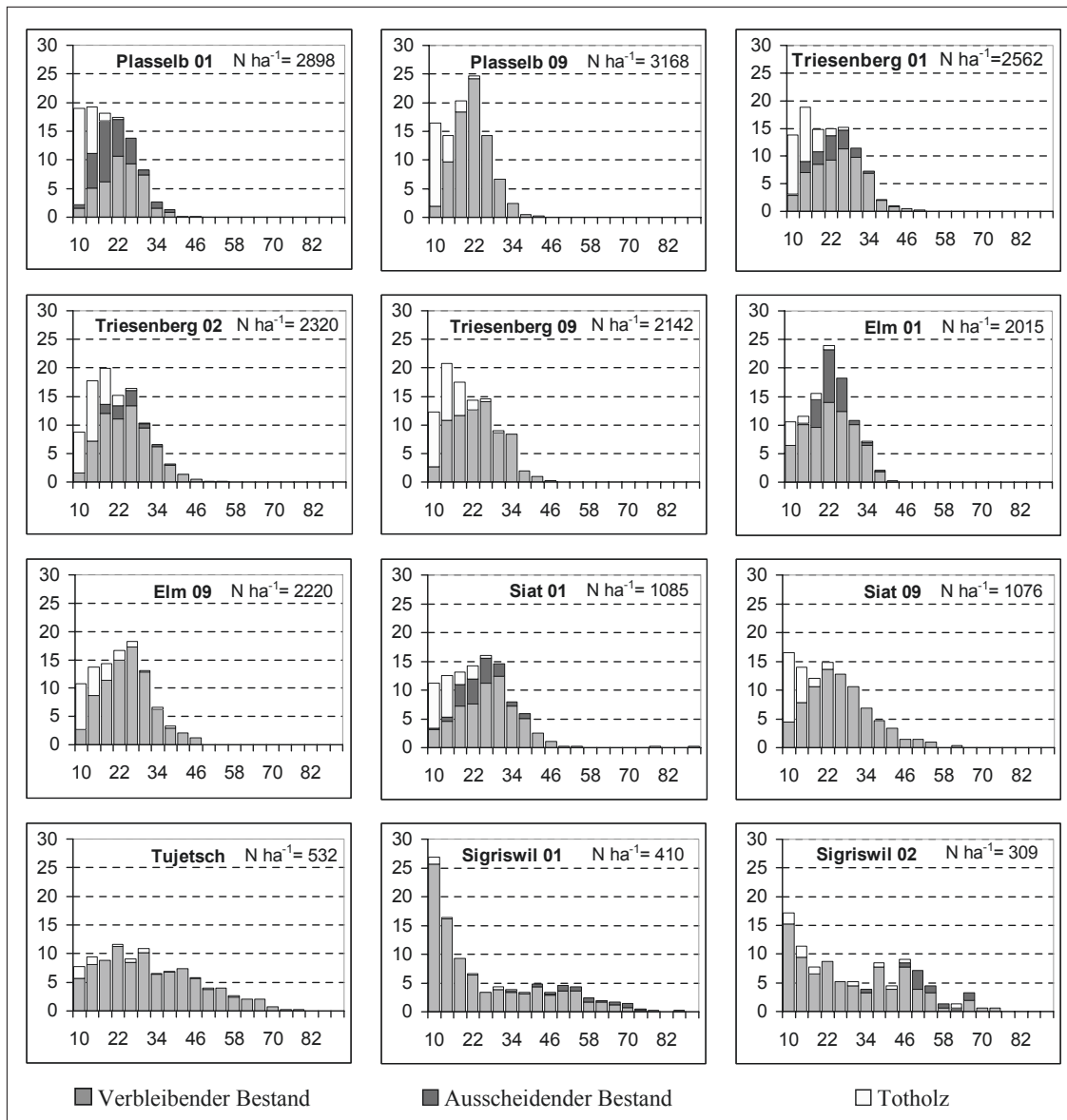


Abbildung 1: Durchmesser-Verteilung von 12 Versuchsflächen in Prozent der Gesamtstammzahl (y-Achse) nach Durchmesser-Klassen [cm] (x-Achse).

Figure 1: Diameter distribution of 12 plots as percentage of total number (y-axis) in diameter classes [cm] (x-axis).

Tabelle 3: Eingriffsstärke; Reduktion von Stammzahl (N), Grundfläche (G) und Vorrat (V₇) in Prozent der Hektarwerte vor der Nutzung (nur lebende Bäume).

Table 3: Intensity of thinning; reductions in stem number (N), basal area (G) and growing stock (V₇) as percentages of the values per hectare before harvesting (living trees only).

	N [%]	G [%]	V ₇ [%]
Plasselb 01	41,9	35,4	34,7
Triesenberg 01	19,4	16,0	15,3
Triesenberg 02	10,7	10,3	10,3
Elm 01	26,1	23,0	22,4
Siat 01	21,5	16,7	16,0
Sigriswil 01	5,5	17,6	18,2
Sigriswil 02	9,5	20,7	22,1

schlag liegt zwischen 1450 und 2000 mm, die grösste Schneehöhe (100-jähriges Ereignis) zwischen 2,4 und 3,9 m (LANDESHYDROLOGIE UND -GEOLOGIE 1992); die mittlere Jahrestemperatur liegt zwischen 5,0 und 2,7 °C, die mittlere Januartemperatur zwischen -4,0 und -5,5 °C und die mittlere Julitemperatur zwischen 12,0 and 11,2 °C (GENSLER 1978, IMHOF 1965). Die Flächen sind nicht als Wälder mit besonderer Schutzfunktion ausgeschieden.

Die Bestände wurden mit der Methode der Gruppe Waldwachstum der WSL aufgenommen, wobei die folgenden Variablen erhoben wurden (für Symbole und Abkürzungen siehe *Tabelle 2*):

- Baumart; Durchmesser in mm, 1,3 m über dem Boden (d_{1,3}, BHD), kreuzweise mit Kluppen gemessen, Messpunkte am Baum permanent markiert; Stammfusskoordinaten, Baumzustand, d.h. lebend (verbleibend oder angezeichnet), stehend oder liegend und tot, Schäden am Baum, z.B. Gipfelbruch, Schältschäden.
- Baumhöhe und Durchmesser in 7 m Höhe (d₇), Höhe des Kronenansatzes und Kronenradien an einem Teilkollektiv, das über den ganzen Durchmesserbereich verteilt ist.

Mit diesen Daten wurden die Baumhöhen mit der Funktion $y = 1,3 + a \cdot e^{b/d_{1,3}}$ berechnet, wobei y = Baumhöhe und a und b Koeffizienten sind. Die Oberdurchmesser d_{dom} und Oberhö-

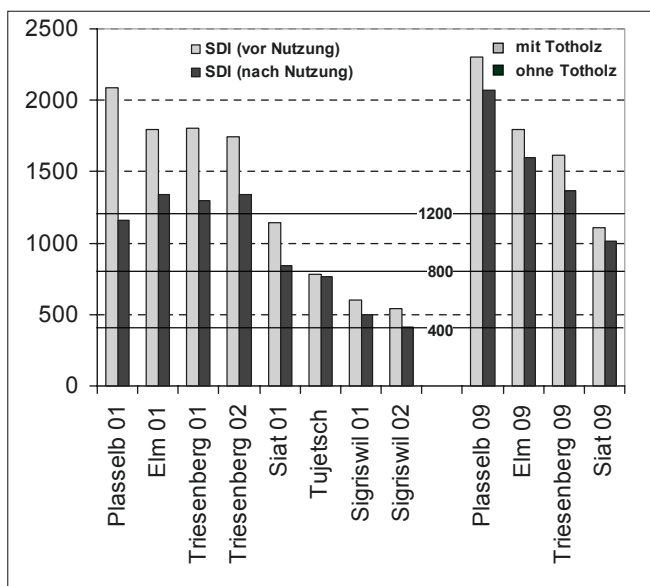


Abbildung 2: Bestandesdichte (Stand Density Index SDI nach DANIEL & STERBA 1980) vor und nach dem Eingriff bzw. «mit Totholz» und «ohne Totholz».

Figure 2: Stand Density Index SDI according to DANIEL & STERBA (1980) before and after the thinning operation.

Tabelle 4: Aggregations-Index R_{C&E} nach CLARK & EVANS (1954), Randeffekt korrigiert nach DONNELLY (1978):

R_{C&E} < 1,0 = Tendenz zu einer geklumpten räumlichen Verteilung; R_{C&E} = 1,0 = zufällige räumliche Verteilung; R_{C&E} > 1,0 = Tendenz zu einer regelmässigen räumlichen Verteilung.

Table 4: Aggregation index R_{C&E} according to CLARK & EVANS (1954) (edge effect corrected according to DONNELLY 1978):

R < 1,0 = tendency to clumped spatial distribution; R = 1,0 = random spatial distribution; R > 1,0 = tendency to regular spatial distribution.

Plot	R _{C&E} (korr)		R _{C&E} (korr)
	vor dem Eingriff	nach dem Eingriff	
Plasselb 01	1,2201***	1,0604(*)	1,3485***
Plasselb 09	1,3485***		
Triesenberg 01	1,0531(*)	1,0529(*)	1,1069*
Triesenberg 02	1,0691(*)	1,1078*	
Triesenberg 09	1,0830*		
Elm 01	1,1833***	1,0887(*)	1,0341
Elm 09	1,0365		
Siat 01	0,6828***	0,7826***	0,8338***
Siat 09	0,7668***		
Tujetsch	0,6521***		0,6669***
Sigriswil 01	0,9976	0,9961	
Sigriswil 02	1,0300*	0,9905	

hen h_{dom} wurden als mittlere Durchmesser bzw. Höhen der 100 dicksten Bäume pro Hektare ermittelt (ZINGG 1999).

Als Mass für die horizontale Verteilung der Bäume wurde der Aggregations-Index R_{C&E} und die Testgrösse T_R zur Bestimmung signifikanter Abweichungen von zufälligen Verteilungen berechnet (CLARK & EVANS 1954); für die durchforsteten Bestände wurde dies vor und nach der Durchforstung durchgeführt. Randeffekte wurden mit der Gleichung von DONNELLY (1978) korrigiert. Zur Bestimmung der Bestandesdichte wurde der Stand Density Index (SDI) nach DANIEL & STERBA (1980) berechnet. Ausserdem kam ein von CAMINO (1976) entwickelter Homogenitäts-Koeffizienten (H_{Koeff}) zur Klassierung der Strukturhomogenität eines Bestandes zur Anwendung (BACHOFEN & ZINGG 2001).

Die Zusammenhänge zwischen den mittleren strukturbeschreibenden Parametern pro Fläche bzw. deren Veränderung durch den Eingriff wurden mittels Berechnung der Mass-Korrelationskoeffizienten beschrieben. Die Signifikanz der Korrelationskoeffizienten wurde ohne Korrektur getestet. Für zwei Zielgrössen, die horizontale Verteilung (Aggregationsindex R_{C&E}) und den Anteil an Bäumen mit h/d-Werten ≤ 0,8, wurden lineare Regressionsmodelle (General Linear Model) zu deren Interpretation berechnet. Die Variablen für das Modell wurden schrittweise rückwärts ausgewählt. Die dafür eingesetzte Software war Systat 10.

3. Ergebnisse

In *Tabelle 3* wird die Eingriffsstärke, d.h. die Reduktion von Stammzahl, Grundfläche und Vorrat im Vergleich zu den Werten vor der Nutzung dargestellt. Die Durchforstungen in Plasselb und Elm waren stark, vor allem für die mittleren Durchmesser-Klassen von 18 bis 30 cm. Die Eingriffe in Triesenberg 01 und 02 entsprechen einer üblichen mässig starken Durchforstung. In Siat war der Eingriff eher vorsichtig, was in als labil betrachteten Beständen eine gängige Praxis ist. Es wurden hauptsächlich Bäume der Durchmesser-Klassen 18 bis 30 cm entfernt.

Die Stammzahlen pro Hektare (*Tabelle 1*) und die Durchmesserverteilungen (*Abbildung 1*) sind entsprechend dem Alter und der Bestandesgeschichte unterschiedlich. Die Stammzahl pro Hektare in den Aufforstungen Plasselb, Triesenberg und Elm sind zwei- bis dreimal so hoch wie in Siat. Im

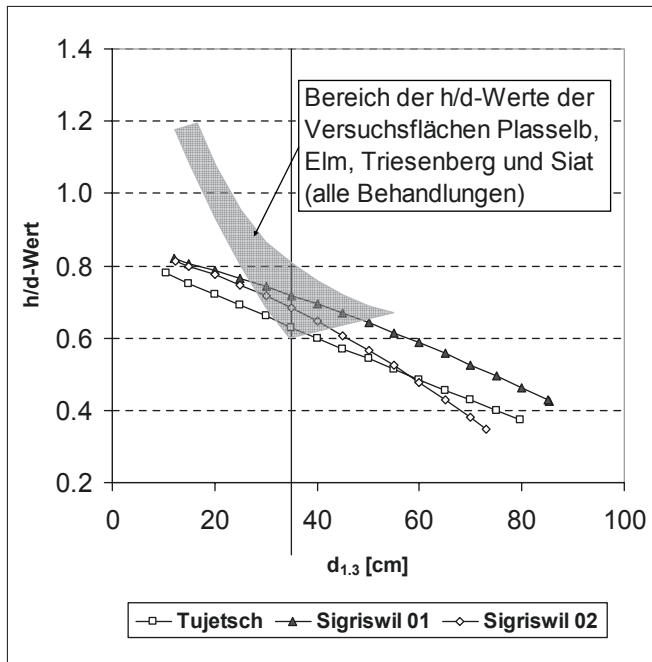


Abbildung 3: Mittlerer Schlankheitsgrad (h/d -Wert) nach Durchmesser. Alle Bäume mit einer Höhenmessung, vor dem Eingriff. Die vertikale Linie bei $d_{1,3}=35$ cm bedeutet, dass alle Bäume darüber einen h/d -Wert $\leq 0,8$ aufweisen. Bäume oberhalb dieser Grenzen haben keine Kronenbrüche.

Figure 3: Mean h/d ratio vs. $d_{1,3}$.

All trees with a height measurement, before harvesting. The limit of $d_{1,3}=35$ cm represents a mean h/d ratio of $\leq 0,8$ for all trees above this limit. Trees above this diameter limit show no crown breaks.

ungleichaltrigen Plenterwald in Sigriswil sind die Stammzahlen deutlich tiefer.

In den Aufforstungen Plasselb, Triesenberg und Elm zeigen die Durchmesserverteilungen des verbleibenden Bestandes typische, etwas rechtsseitig asymmetrische Verteilungen mit einem Stammzahlmaximum um etwa 22 cm $d_{1,3}$, während in Sigriswil die Stammzahlen mit zunehmendem Durchmesser abnehmen, was typisch ist für einen Plenterwald. Die Versuchsfläche Tujetsch mit ihrer Rottenstruktur zeigt eine ähnliche, aber weniger deutliche Abnahme der Stammzahl mit zunehmendem Durchmesser. Die Durchmesserverteilung ist wegen des höheren Bestandesalters in Siat deutlich breiter als in Triesenberg, Plasselb und Elm (Tabelle 1): Die grössten Durchmesser liegen bei 61 cm in Siat und bei 42 bis 51 cm in Triesenberg, Plasselb und Elm. Die breitesten Durchmesserverteilungen sind jene des Plenterwaldes in Sigriswil und der Versuchsfläche in Tujetsch mit Durchmesser-Maxima von 77 bzw. 80 cm.

In den Aufforstungen Plasselb, Triesenberg und Elm ist die Stammzahl der untersten Durchmesserklasse ($d_{1,3} = 8$ bis 12 cm) klein. Im Hinblick auf die gewünschte mehrschichtige Struktur ist dies von Bedeutung.

Die räumlichen Verteilungen der Bäume, d.h. die Textur vor und nach der Durchforstung werden mit Aggregations-Indices $R_{C\&E}$ (CLARK & EVANS 1954) beschrieben (Tabelle 4). In den Aufforstungen Plasselb und Elm (jeweils nur Fläche 01) waren die Bäume vor dem Eingriff regelmässig verteilt; die Pflanzreihen sind im Bestand immer noch sichtbar. In Triesenberg ist die ursprünglich regelmässige Verteilung nicht mehr offensichtlich, was nach Auskunft des lokalen Försters eine Folge von Schneedruckschäden sein könnte. In Siat und Tujetsch ist die Verteilung der Bäume geklumpt, was die beobachtete Rottenstruktur dieser Bestände bestätigt. Im Plenterwald Sigriswil ist die Verteilung zufällig.

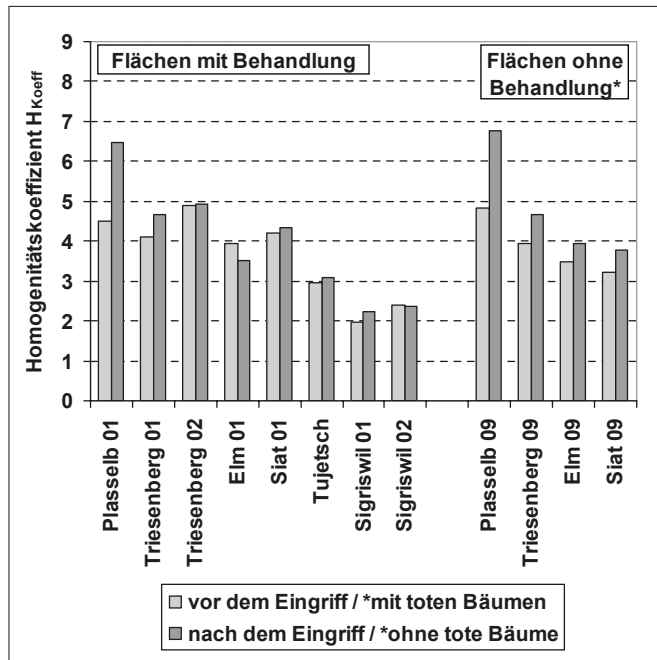


Abbildung 4: Homogenitäts-Koeffizient H_{Koeff} vor und nach dem Eingriff (für Bestände ohne Eingriff, mit und ohne stehendes Totholz).

Figure 4: Coefficient of homogeneity H before and after thinning (for the stands without thinning, with and without standing dead trees).

Die Eingriffe veränderten die räumliche Verteilung kaum. Trotzdem widerspiegelt die Veränderung des Indexes $R_{C\&E}$, in welche Richtung sich der Eingriff ausgewirkt hat: Während in Plasselb und Elm die Tendenz in Richtung zufälliger Verteilung ging, änderte sich der Index in Triesenberg 01 nur wenig und in Triesenberg 02 wurde die Verteilung sogar eher regelmässiger. In Siat bewirkte die Durchforstung eine Änderung der geklumpten Struktur in Richtung einer eher zufälligen Verteilung. In Plasselb und Elm war das Ziel der Durchforstung die Bildung von Baumgruppen durch das Schaffen von Öffnungen zwischen ihnen. In Triesenberg 02 war die Absicht eher die Förderung einzelner Bäume. In Sigriswil blieb die zufällige Verteilung auch nach der Nutzung erhalten.

Nebst der räumlichen Verteilung ist die Bestandesdichte von Bedeutung. Die Versuchsfläche in Plasselb wies vor der Durchforstung die höchste Dichte auf (Abbildung 2). Elm und Triesenberg hatten ähnliche Bestandesdichten, während die Dichte in Siat nur etwa halb so hoch war wie jene in Plasselb, wenn auch deutlich höher als in Tujetsch und Sigriswil. Von den unbehandelten Vergleichsflächen hatte jene von Plasselb ebenfalls einen sehr hohen SDI. In Plasselb wurde der SDI durch die Durchforstung beinahe halbiert. In Elm, Triesenberg, Siat und Sigriswil 02 fiel die Bestandesdichte um 23 bis 28%. In den unbehandelten Flächen lag der SDI ohne tote Bäume um 2% bis 11% tiefer, in Sigriswil 02 um 17%. In den behandelten Teilflächen der Aufforstungen Plasselb 01, Triesenberg 01, 02 und Elm 01 verminderte der Eingriff den SDI nur in einem Fall (Plasselb 01) auf den SDI des vergleichsweise lockeren Bestandes von Siat. Das ist das Ergebnis der starken Durchforstung in Plasselb. In Siat reduzierte die Durchforstung den SDI ungefähr auf jenen von Tujetsch.

In den gleichaltrigen Beständen nahm der Schlankheitsgrad (h/d -Wert) mit zunehmendem $d_{1,3}$ ab (Abbildung 3). In den Kontrollflächen in Plasselb, Triesenberg, Elm und Siat wiesen nur die Bäume mit einem $d_{1,3}$ um 35 cm oder grösser h/d -Werte unter 0,8 auf. In Tujetsch und Sigriswil wiesen alle Durchmesserklassen solche Werte auf. Interessanterweise ent-

Tabelle 5: Anteil an stehendem und liegendem Totholz in Prozent der Grundfläche G und des Vorrates V₇ vor dem Eingriff.

Table 5: Proportion of deadwood (standing and lying): percentage of basal area G and growing stock V₇ before thinning operations.

Versuchsfläche	G [%]	V ₇ [%]
Plasselb 01	8,2	6,2
Plasselb 09	7,1	5,5
Triesenberg 01	10,1	13,3
Triesenberg 02	10,7	8,1
Triesenberg 09	12,3	9,7
Elm 01	2,9	9,6
Elm 09	8,8	2,3
Siat 01	7,8	11,0
Siat 09	5,3	6,5
Tujetsch	1,8	5,4
Sigriswil 01	1,7	1,8
Sigriswil 02	6,1	1,7

spricht der d_{1,3} von etwa 35 cm auch der Grenze, oberhalb derer keine Kronenbrüche beobachtet wurden.

Die Durchforstung erhöhte den Anteil der Bäume mit h/d-Werten unter 0,8 in Plasselb und Elm um 33%, in Triesenberg 01 und 02 um 12% bzw. 17% und in Siat um 13%. Der Anteil

an Bäumen mit h/d-Werten über 1,0 wurde in Plasselb um 18%, in Siat um 12% und in Triesenberg und Elm um weniger als 10% reduziert.

Bäume in dichten Beständen mit regelmässigen und zufälligen Verteilungen in Plasselb, Triesenberg und Elm hatten deutlich kürzere Kronen als jene in Siat. Das Kronenprozent (Verhältnis Kronenlänge zu Baumhöhe) variierte zwischen 42 und 48% in Plasselb, Triesenberg und Elm und zwischen 53 und 60% in Siat, während es in Sigriswil zwischen 72 und 77% lag. Für Tujetsch lagen dazu keine Daten vor. In keiner Versuchsfläche wurde das Kronenprozent durch die Behandlung signifikant verändert.

Die Eingriffe wirkten sich je nach Versuchsfläche unterschiedlich auf die Homogenität der Bestandesstrukturen aus (Abbildung 4). In den Plenterwäldern in Sigriswil und Tujetsch gab es fast keine Veränderung. In Siat 01 und Triesenberg 02 änderte sich die Homogenität nur wenig. In den Versuchsflächen Triesenberg 01 und vor allem in Plasselb 01 nahm die Homogenität zu. Nur im Bestand in Elm 01 führte die Durchforstung zu einer leichten Abnahme.

Die Anteile von stehendem und liegendem Totholz sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Tote Bäume gehören fast ausschliesslich in die d_{1,3}-Klassen unter 30 cm mit einem Maxi-

Tabelle 6: Mass-Korrelationsmatrix der strukturbeschreibenden Parameter nach dem Eingriff.

Die Korrelationen vor dem Eingriff weichen nur sehr wenig davon ab. Die hohen Korrelationen zwischen den einzelnen Parametern sind auffällig. Fett gedruckt sind Korrelationskoeffizienten mit Absolutwerten über 0,75, Wahrscheinlichkeit p, dass die Korrelation von 0 verschieden ist, p<0,05 = *, p<0,01 = **, p<0,001 = ***.

Table 6: Correlation matrix of the parameters describing structure after thinning.

The correlations before thinning differ only slightly. The high correlations between some parameters are striking. Correlation coefficients with absolute values higher than 0.75 given in bold print. Probability p, that the correlation is not 0, p<0,05 = *, p<0,01 = **, p<0,001 = ***.

	R _{korr}	SDI	Kronen %	N Bäume mit h/d ≤ 0,8 [%]	H _{Koeff}	G	V ₇	G Totholz [%]	V ₇ Totholz [%]
R _{korr} (Clark & Evans)	1								
SDI	0,721*	1							
Kronen-%	-0,429	-0,813**	1						
N Bäume mit h/d ≤ 0,8 [%]	-0,396	-0,818**	0,740**	1					
H _{Koeff}	0,532	0,778**	-0,810**	-0,813**	1				
G	0,670*	0,971***	-0,814**	-0,829**	0,749**	1			
V ₇	0,604	0,947***	-0,791**	-0,827**	0,682*	0,987***	1		
G Totholz [%]	0,194	0,438	-0,658*	-0,505	0,529	0,456	0,515	1	
V ₇ Totholz [%]	-0,074	0,343	-0,637*	-0,488	0,353	0,271	0,288	0,435	1

Tabelle 7: Mass-Korrelationsmatrix der Veränderung der strukturbeschreibenden Parameter.

Korrelationskoeffizienten mit Absolutwerten über 0,4 sind fett hervorgehoben.

Table 7: Correlation matrix of the changes of the parameters describing structure.

Correlation coefficients with absolute values higher than 0.4 given in bold print.

	R _{korr}	SDI	Kronen %	N Bäume mit h/d ≤ 0,8 [%]	H _{Koeff}	G	V ₇	G Totholz [%]	V ₇ Totholz [%]
R _{korr} (Clark & Evans)	1								
SDI	0,658*	1							
Kronen-%	0,147	-0,282	1						
N Bäume mit h/d ≤ 0,8 [%]	0,294	-0,059	-0,105	1					
H _{Koeff}	0,044	-0,366	0,089	0,279	1				
G	-0,110	0,535	-0,509	-0,080	-0,348	1			
V ₇	-0,101	0,474	-0,550	0,040	-0,148	0,947***	1		
G Totholz [%]	0,500	-0,054	-0,010	0,425	0,303	-0,321	-0,197	1	
V ₇ Totholz [%]	0,178	-0,272	0,343	0,161	-0,060	-0,387	-0,557	0,436	1

Tabelle 8: Regressionsmodell für die Veränderung des Index $R_{C\&E}$ (Veränderung der Horizontalverteilung der Bäume) durch den Eingriff.

Abhängige Variable $\Delta R_{C\&E}$, $N=11$, multiples $R^2=0,947$, adjustiertes multiples $R^2=0,893$, Standardfehler der Schätzung $=0,024$.

Table 8: Regression model for the changes of the index $R_{C\&E}$ (changes of the horizontal distribution of the trees) due to the thinning operations.

Dependent variable $\Delta R_{C\&E}$, $N=11$, multiple $R^2=0.947$, adjusted multiple $R^2=0.893$, standard error of estimate $= 0.024$.

Effekt	Koeffizient	Std Fehler	Std Koef	Toleranz	t	P(2seitig)
Konstante	-0,024	0,021	0,000		-1,146	0,304
Δ SDI	0,000	0,000	0,625	0,184	2,598	0,048
Δ Kronen-%	0,014	0,004	0,446	0,642	3,462	0,018
Δ G	0,004	0,002	0,571	0,198	2,460	0,057
Δ G Totholz [%]	0,010	0,003	0,462	0,582	3,412	0,019
Δ V_7 Totholz [%]	0,006	0,002	0,306	0,647	2,380	0,063

Varianzanalyse

Quelle	Summe der Abweichungsquadrate	Freiheitsgrade	Mittleres Abweichungsquadrat	F-Wert	P
Regression	0,04933	5	0,00987	17,73525	0,00337
Residuen	0,00278	5	0,00056		

Tabelle 9: Regressionsmodell für die Veränderung des Anteils der Bäume mit günstigem h/d-Verhältnis durch den Eingriff.

Abhängige Variable $\Delta N \% h/d \leq 0,8$, $N=11$, multiples $R^2=0,353$, adjustiertes multiples $R^2=0,191$, Standardfehler der Schätzung $=0,203$.

Table 9: Regression model for the changes of the proportion of trees with a favorable h/d-relation due to the thinning operations.

Dependent variable $\Delta N \% h/d \leq 0,8$, $N=11$, multiple $R^2=0.353$, adjusted multiple $R^2=0.191$, standard error of estimate $=0,203$.

Effekt	Koeffizient	Std Fehler	Std Koef	Toleranz	t	P(seitig)
Konstante	0,024	0,108	0,000		2,070	0,072
Δ SDI	-0,001	0,001	-1,232	0,231	-2,084	0,071
Δ G	0,025	0,013	1,114	0,231	1,884	0,096

Varianzanalyse

Quelle	Summe der Abweichungsquadrate	Freiheitsgrade	Mittleres Abweichungsquadrat	F-Wert	P
Regression	0,179	2	0,089	2,178	0,176
Residuen	0,328	8	0,041		

mum in der 10 cm-Klasse (Abbildung 1). Die wenigen toten Bäume in höheren $d_{1,3}$ -Klassen wurden entweder durch den Wind oder wegen Schneelast geworfen oder bei Zwangsnutzungen entnommen.

Die strukturbeschreibenden Parameter – die horizontale Verteilung $R_{C\&E}$, die Bestandesdichte SDI, das Kronenprozent, der Anteil der Bäume mit günstigem h/d-Wert ($\leq 0,8$), die Homogenität (H_{Koeff}), die Grundfläche G und der Derbholzvorrat V_7 – sind untereinander positiv oder negativ korreliert, nur schwach die Totholzanteile (G und V_7) (Tabelle 6). So ist z.B. die Bestandesdichte mit dem Anteil der Bäume mit einem h/d-Wert $\leq 0,8$ signifikant negativ korreliert, d.h. mit zunehmender Bestandesdichte nimmt der Anteil der Bäume mit niedrigem h/d-Verhältnis ab, dagegen mit zunehmendem Kronenprozent zu. Daher sind auch Bestandesdichte und Kronenprozent signifikant negativ korreliert. Weniger stark sind die Zusammenhänge zwischen den horizontalen Verteilungsmustern und dem h/d-Wert oder dem Kronenprozent. Die Bestandesdichte ist positiv ($p=0,012$) mit der horizontalen Verteilung $R_{C\&E}$ korreliert, d.h. bei höherer Bestandesdichte wird auch der Aggregationsindex $R_{C\&E}$ grösser.

In Tabelle 7 sind die Korrelationen der Veränderungen der Strukturparameter zusammengestellt. Hier ist – nebst jener

zwischen G und V_7 – nur die Korrelation zwischen $R_{C\&E}$ und SDI leicht ($p=0,02$) signifikant. Die Zusammenhänge sind, wie Regressionsmodelle zeigen, hier weniger straff. Die Veränderung der Horizontalverteilung der Bäume (Variable $R_{C\&E}$) kann (95% der Streuung) gut (Tabelle 8), jene der Veränderung des Anteils der Bäume mit h/d-Werten $\leq 0,8$ nur unbefriedigend (35% der Streuung) erklärt werden (Tabelle 9). Die Streuungen der Residuen sind in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt.

4. Diskussion

Um Bestandesstrukturen von subalpinen Fichtenwäldern zu beschreiben, sind mehrere Strukturparameter nötig. In den behandelten Teilflächen war das Ziel der Eingriffe, dauernde ungleichförmige Strukturen ähnlich jenen von Plenterwäldern anzustreben bzw. zu erhalten. Bei Beginn dieser Arbeit zeigten die Versuchsflächen unterschiedliche Zustände, welche bei gleichem langfristigem Ziel, unterschiedliche Eingriffsstärken erforderten. Von den oben erwähnten Parametern reagieren der $R_{C\&E}$, der SDI und der h/d-Wert am empfindlichsten auf die Eingriffe, während die Kronenlänge und der Homogenitäts-Koeffizient weniger stark reagieren und damit auch weniger gut geeignet sind, kurzfristige Behandlungseffekte zu zeigen.

Langfristiges Ziel der Eingriffe ist unter anderem eine geklumpte, rotten-ähnliche Struktur. Im ersten Eingriff ist das noch kaum feststellbar, weil die Bäume eher im Hinblick auf die Entwicklung von Individuen und der Verjüngung als im Hinblick auf Verbesserung der Textur entfernt wurden. Zufällige oder geklumpte Baumverteilungen, die mit

den hier durchgeführten Eingriffen angestrebt werden, scheinen ausserdem nur bei geringeren Bestandesdichten möglich zu sein. Die Veränderung der räumlichen Verteilung (Aggregations-Index $R_{C\&E}$ nach CLARK & EVANS 1954) und des SDI nach DANIEL & STERBA (1980) scheinen gute Indikatoren für die Wirkung der gewählten Behandlung zu sein. Grund dafür ist, dass diese Parameter direkt durch die Änderung der Stammzahl und die räumliche Verteilung der entfernten Bäume beeinflusst werden.

In den Aufforstungen Plasselb, Triesenberg und Elm ist die Stammzahl der untersten Durchmesserklasse ($d_{1,3} = 8-12$ cm) klein. Im Hinblick auf die gewünschte mehrschichtige Struktur ist dies von Bedeutung. Mit der Entwicklung der Bestände zu ungleichförmigen Strukturen werden die Bäume dieser Durchmesserklasse in Zukunft die Mittelschicht bilden. Dazu ist eine ausreichende Anzahl mit kleinem Durchmesser nötig. In keiner der vier Versuchsflächen verbesserte sich die Durchmesserverteilung in Richtung einer Plenterverteilung, da das vorrangige Ziel die Verbesserung und Erhaltung der Bestandesstabilität und die Einleitung der Verjüngung war. Deshalb können die Auswirkungen der Behandlung auf das Wachstum und die Entwicklung der Struktur zu diesem Zeitpunkt noch nicht beurteilt werden.

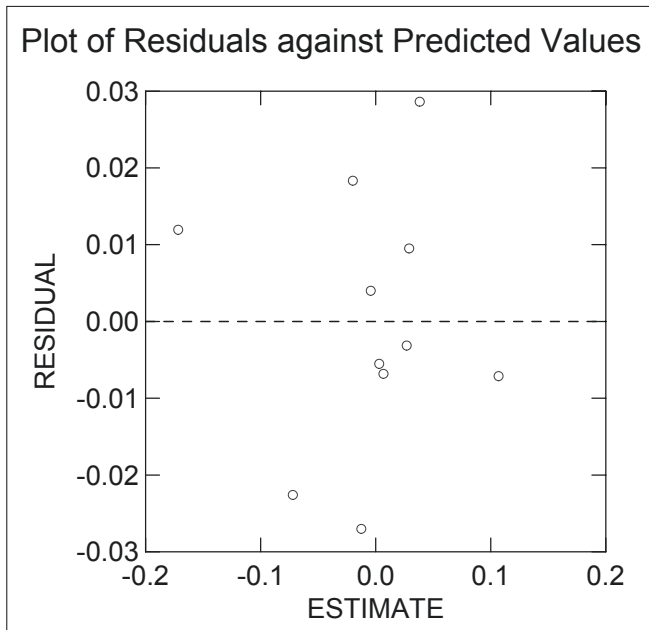


Abbildung 5: Streuung der Residuen im Modell «Veränderung des Index $R_{C\&E}$ ».

Figure 5: Residual plot of the model «Changes of the index $R_{C\&E}$ ».

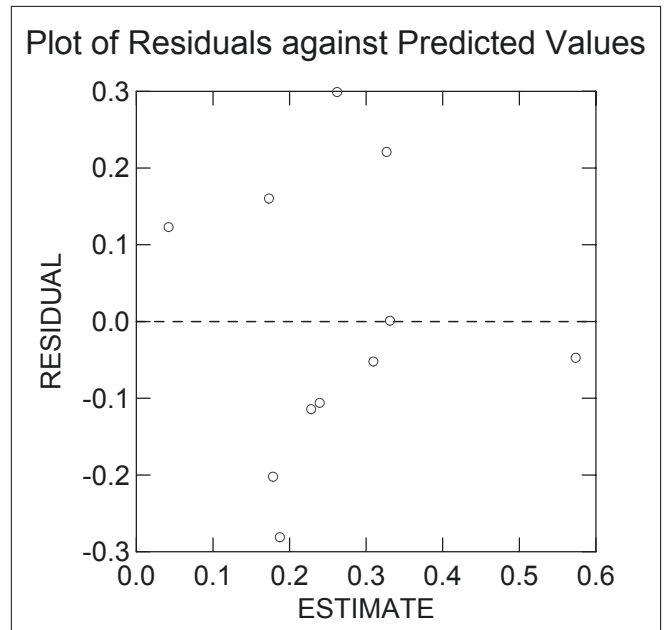


Abbildung 6: Streuung der Residuen im Modell «Veränderung des Anteils der Bäume mit günstigem h/d-Verhältnis».

Figure 6: Residual plot of the model «Changes of the proportion of trees with a favorable h/d-ratio».

Der SDI wird von BRASSEL *et al.* (1999) zur Beurteilung der relativen Schutzwirkung gegen Steinschlag herangezogen. Nach deren Kriterien beurteilt, ergeben sich für die gut strukturierten Bestände von Sigriswil und Tujetsch z.T. nur knapp mittlere (SDI = 400 bis 800) Schutzwirkungen, für Siat vor dem Eingriff klar, nach dem Eingriff nur noch knapp gute (SDI = 800 bis 1200). Nur die sehr dichten Bestände in Plasselb, Elm und Triesenberg mit einem $SDI \geq 1200$ können als Bestände mit sehr guter Schutzwirkung gegen Steinschlag betrachtet werden. Allerdings ist die Bestandesdichte (SDI) mit $-0,87$ stark negativ mit dem Anteil an Bäumen mit einem h/d-Verhältnis $\leq 0,8$ korreliert, d.h. je grösser die Bestandesdichte, umso kleiner der Anteil stabiler Bäume. Hier liegt also ein Optimierungsproblem vor.

Die Bedeutung des h/d-Wertes für die Stabilität der Fichte gegenüber Sturm und Schneelast wurde schon öfters diskutiert (unter anderen ROTTMANN 1983, 1986, ABETZ 1976). Fichten haben h/d-Werte zwischen etwa 0,4 und 1,2. Die in den Versuchsflächen Plasselb, Triesenberg, Elm und Siat beobachteten Werte liegen, vor allem für Durchmesser ≥ 35 cm, unter 0,8, was oft als stabil betrachtet wird (z.B. GASSEBNER 1986). Im Gegensatz zur Bedeutung des h/d-Wertes in Bezug auf Schneelast wird ein Zusammenhang zwischen Sturmschäden und h/d-Werten nicht von allen Arbeiten gefunden (HEROLD & ULMER 2001). Auch PRPIĆ (1969) oder SCHMID-HAAS & BACHOFEN (1991) fanden in dieser Beziehung keine klaren Ergebnisse und unterstreichen, dass andere Faktoren wie die Stellung des Einzelbaumes im Bestand oder die Bewurzelung und Fäulen eine wichtige Rolle spielten. Indessen fand MÖHRING (1980) in seiner Arbeit über Fichte im Oberharz (Deutschland) und unter Anwendung von Korrelationsanalysen, dass Schneelastschäden vom Kronenprozent, vom h/d-Wert, von der Astlänge und -dicke abhängig sind. In diesem Fall war das Kronenprozent wichtiger als der h/d-Wert. In zahlreichen anderen Studien über Durchforstung und Baum-Abstände (KRAMER 1988) wurden enge Zusammenhänge zwischen dem mittleren Kronenprozent und der Widerstandskraft gegen Schneebruch für Fichte und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) gefunden (BRAASTAD 1970, KRAMER 1975, MATTHAEI 1980). Weil Schnee im Gebirgswald ein entscheidender Faktor ist, kann geschlossen werden, dass die Änderungen der h/d-Werte ein

brauchbarer Parameter ist, um die Wirkung einer gewählten Behandlung abzuschätzen. Dieses Ziel wurde mit allen Arten der Behandlung erreicht. Eine stärkere Durchforstung ergab eine stärkere Wirkung.

Auch die relative Kronenlänge (Kronenprozent) eines Baumes wird für seine Stabilität als wichtig betrachtet (KRAMER 1988). Die Möglichkeit, eine lange Krone zu entwickeln, hängt von der Bestandesdichte und der horizontalen Verteilung und dem Alter der Bäume ab (KRAMER 1988). Obwohl in Siat während Jahrzehnten nur Zwangsnutzungen ausgeführt wurden und obwohl die Fichten eng beieinander aufgewachsen sind, manchmal in Gruppen, haben die meisten von ihnen lange Kronen. Die langen Kronen in Siat lassen vermuten, dass die Fichten von Anfang an genug Raum hatten. Allerdings sind die Kronen der Fichten in Sigriswil noch länger.

Die Tatsache, dass die relative Kronenlänge mit dem $d_{1,3}$ zunimmt, wurde schon von BURGER (1939) beschrieben. BADOUX (1946) bemerkte, dass bei der Föhre auch eine starke Durchforstung in bereits fortgeschrittenem Bestandesalter die Kronenbildung kaum mehr beeinflussen kann. Dies gilt wohl auch für andere Baumarten, vor allem mit zunehmender Zeit nach der Kulmination des Höhenwachstums. Es wird deshalb interessant sein, die Entwicklung der Kronenlänge in Plasselb, Triesenberg und Elm in Zukunft zu beobachten. Trotz der wahrscheinlichen Bedeutung des Kronenprozents für die Bestandesstabilität ist es kaum möglich, die Wirkung der gewählten Behandlung abzuschätzen, da die Änderung des Kronenzustandes erst nach weiterem Bestandeswachstum sichtbar wird.

Heterogene Bestände haben einen tiefen Homogenitätskoeffizienten, homogene einen hohen. Für Plenterwälder liegt der Koeffizient zwischen 1,3 und 2,8, wie in der Vergleichsfläche Sigriswil mit 2,0; für gleichförmige Bestände liegen die Werte bei Hochdurchforstung zwischen 2,2 und 4,2 und bei Niederdurchforstung zwischen 4,0 und 10,0 (CAMINO 1976). Für alle hier untersuchten Versuchsflächen ist das langfristige Ziel, eine mehrschichtige Struktur ähnlich jener eines Plenterwaldes heranzubilden bzw. zu erhalten. Die Homogenitätskoeffizienten sollten sich bei Werten unter 3,0 einpendeln. Die angewandte Behandlung führte nur im Fall von Elm 01 in die gewünschte Richtung. In den anderen Fällen nahm

der Homogenitäts-Koeffizient zu. In den Vergleichsflächen ohne Durchforstung (09) verstärkte die natürliche Mortalität die gleichförmige Struktur der Bestände. Die Homogenitäts-Koeffizienten «ohne stehende tote Bäume» waren grösser als jene «mit stehenden toten Bäumen». Es bleibt abzuwarten, ob die Homogenität dieser Flächen in Zukunft weiter zunehmen wird. Zwar ist es möglich, die Homogenitäts-Koeffizienten mit starken Eingriffen zu beeinflussen; ob sie sich in die gewünschte Richtung entwickeln, wird man erst mit einer längeren Beobachtungsdauer sehen. In Plenterwäldern sollten Nutzungen als Folge ihrer Charakteristik keine wesentlichen Änderungen in der Homogenität bewirken (BACHOFEN 1999).

Nach BRASSEL *et al.* (1999) liegt der mittlere Anteil von stehendem und liegendem Totholz ($d_{1,3} \geq 12$ cm) in den Wäldern der subalpinen Zone in der Schweiz bei etwa 7% des Vorrates. In Urwäldern der «Bergzone» liegt der Anteil von stehendem und liegendem Totholz zwischen 3% und 50% des Gesamtvorrates, abhängig von der Entwicklungsphase (BURSCHEL 1992, HILLGARTER 1971, LEIBUNDGUT 1982, 1993, KORPEL' 1995, 1997). Deshalb kann geschlossen werden, dass, obwohl die untersuchten Bestände nie waldbaulich behandelt wurden, der Anteil des Totholzes nicht höher ist als im Mittel in den subalpinen Wäldern der Schweiz und in keinem Fall die Werte von Urwäldern in der Zerfallsphase erreicht.

Die untersuchten Strukturparameter sind eng korreliert, nicht aber deren Veränderung. Das Erklärungsmodell für die Veränderung der horizontalen Verteilung ($R_{C\&E}$) gibt ein plausibles Resultat, wenn auch alle ins Modell eingeschlossenen Parameter – Veränderung des SDI, des Kronenprozents, der Grundfläche und der Totholzanteile (G und V_7) – direkt oder indirekt die Bestandesdichte beschreiben. Das Modell für den stabilitätsrelevanten Parameter Anteil der Bäume mit einem h/d -Verhältnis $\leq 0,8$ erklärt mit den Variablen SDI und der Grundfläche nur etwa 35% der Varianz, wobei auch bei diesem Modell die Bestandesdichte durch zwei Parameter vertreten ist.

Neun Kilometer westlich von Siat, in ungefähr derselben Höhenlage und mit ungefähr derselben Exposition, liegt der subalpine Fichtenurwald Scatlè. Nach HILLGARTER (1971) könnte ein Unterlassen von waldbaulichen Massnahmen in Schutzwäldern in solchen Bedingungen einen wirksamen Langzeitschutz in Frage stellen. Allerdings erwähnt er auch, dass in Scatlè ein grossflächiger Zusammenbruch kaum erwartet werden muss, weil die Kleintopografie in der Fläche stark wechselt und die unterschiedlichen Entwicklungsphasen auch darum nur kleine Flächen bedecken. Aufgrund Hillgarters Argumentation kann angenommen werden, dass Bestände, wie jener in Siat auf homogenen Standorten, sich selber überlassen, vorzeitig labil werden könnten und ihr Zustand jenem eines Altholzes und anschliessend der Zerfallsphase in Scatlè gleichen würde (BACHOFEN & ZINGG 1999 und 2001). Durchforstungen in Schutzwäldern haben das Ziel, durch die Förderung der Verjüngung und der Stufigkeit die Bestandesstruktur im Laufe der Zeit jener von Gebirgspflanzwäldern anzunähern und dann möglichst lange Zeit in diesem Zustand zu erhalten.

STROBEL (1997) untersuchte einen subalpinen Fichtenwald in Tujetsch: «Das Beispiel von Uaul Tgom zeigt, dass sich bei einer günstigen Vertikalstruktur im Laufe der Zeit eine stabile Rottenstruktur auch ohne menschlichen Einfluss entwickeln kann» (STROBEL 1997). Er weist darauf hin, dass sogar in solchen gut strukturierten Wäldern waldbauliche Massnahmen für die Stabilitäts-erhaltung an einzelnen Stellen nötig werden können, wenn die Abstände zwischen den Rotten zu klein werden. Eingriffe müssen zum richtigen Zeitpunkt erfolgen, um zu verhindern, dass Rotten zusammenwachsen und grössere Kollektive mit beschränkter Stabilität bilden.

Auf der Grundlage der hier vorgestellten Daten können verschiedene Arten von Eingriffen vorläufig wie folgt unterschieden werden: starke Eingriffe wie in Plasselb oder Elm verändern bereits mit der ersten Nutzung die Bestandesstruktur in die gewünschte Richtung. Mit schwachen Eingriffen wie in Triesenberg und Siat ist dies nicht der Fall. Allerdings können starke Eingriffe die Bestandesstabilität gefährden. Sowohl bei starken wie auch bei schwachen Eingriffen sind die Langzeitfolgen der gewählten Behandlung erst nach einigen Jahrzehnten sichtbar. Es muss berücksichtigt werden, dass die hier ausgewiesenen Veränderungen rein rechnerisch sind und damit allenfalls einen Hinweis auf die Richtung des durchgeführten Eingriffes geben können. Wie sich diese Veränderungen in Zukunft als Folge des durch sie beeinflussten Wachstums der Bäume und Bestände auf die Struktur und die Stabilität auswirken werden, werden erst die Folgeaufnahmen in 10 bis 15 Jahren zeigen.

5. Folgerungen

Diese Arbeit zeigt in einer ersten Analyse, dass es möglich ist, ausgehend von unterschiedlichen Zuständen, die Bestandesstrukturen in Richtung eines ungleichaltrigen, ungleichförmigen Gebirgspflanzwaldes zu beeinflussen, wenn auch eine Beurteilung der langfristigen Wirkung dieser Veränderungen erst mit Folgeaufnahmen festgestellt werden kann. Es ist schon jetzt möglich, mittels eines Vergleichs mit dem in der Nähe gelegenen Urwald Scatlè eine vorsichtige Prognose für die Bestandesentwicklung in Siat zu wagen. Ohne Durchforstungen wird sich die Bestandesstabilität wahrscheinlich verschlechtern und damit die Wirkung als Schutzwald. Das dürfte auch für die Bestände in Plasselb, Triesenberg und Elm zutreffen. Allerdings sind die zusätzlichen Risiken in der Zeit nach der Durchforstung nicht bekannt. Nach solchen Durchforstungen ist die Bestandesstabilität möglicherweise reduziert (DOBBERTEIN 2002). Allerdings zeigten die Beobachtungen in den Jahren nach den Durchforstungen keine zusätzlichen Schäden durch z.B. Schneedruck oder Windwurf. Bei solchen Überlegungen zum allfälligen Nutzen und zu den Gefahren von Eingriffen darf in jedem Fall auch das Verhältnis zum Aufwand nicht ausser Acht gelassen werden (BRANG *et al.* 2004). Diese Analyse wird durch die Modellbetrachtung bestätigt: Die Eingriffe haben die Bestandesdichte, vor allem durch Entnahmen in den mittleren Durchmesserklassen, reduziert und die Horizontalverteilung der Bäume in Richtung rottenartiger Gruppen günstig beeinflusst. Der Anteil an Bäumen mit günstigem h/d -Verhältnis wurde rein rechnerisch erhöht, durch Entnahme durchschnittlich eher schlankerer Bäume. Die Eingriffe waren also zielführend.

Das Aufkommen von Naturverjüngung ist sehr wichtig, wenn das Ziel einer mehrschichtigen, ungleichaltrigen Struktur erreicht werden soll. In dieser Beziehung ist die Beurteilung der Wirkung der Behandlung noch nicht möglich. Wegen der langsamen Entwicklung von Wäldern auf diesen Standorten wird dies wahrscheinlich auch bei den nächsten Aufnahmen in 8 bis 12 Jahren nach den ersten Durchforstungen noch nicht der Fall sein, wenn die Kluppschwelle bei 8 cm beibehalten wird.

Ergänzend zur Aufnahme der Bäume über der Kluppschwelle wird in allen Untersuchungsflächen die Verjüngung bis hinunter zum mindestens einem Jahr alten Sämling in einem Stichprobenraster aufgenommen (BRANG & KULL 1999). Das soll zur Erfolgskontrolle der Eingriffe beitragen (BACHOFEN & BRANG 2001).

Wenn auch die hier vorgestellten Ergebnisse einige Informationen über die Wirkung der Behandlungen geben, besteht aber kein Zweifel, dass eine nur einmalige Bestandesauf-

nahme und Analyse des ersten Eingriffes für das Verständnis der Dynamik der Waldentwicklung nicht genügt, zumal viele der hier vorgestellten Variablen und vor allem deren Veränderung ja nur rechnerischer Art sind. Die weitere Entwicklung der Bestände wird deshalb auch in Zukunft beobachtet und dokumentiert. Langfristige Beobachtungen sind wichtig. Dafür sind langfristige Verpflichtungen nötig. Nur das Verständnis von langfristigen Entwicklungen kann nützliches Wissen zur Verfügung stellen und kann helfen, die Zusammenhänge zwischen Walddynamik, Störungsereignissen, waldbaulichen Eingriffen und Schutzwirkung besser abzuschätzen und damit die praktische Arbeit der Gebirgsförster zu unterstützen und zu erleichtern.

Zusammenfassung

Viele Fichtenbestände in den Schweizer Alpen wurden nie oder seit langem nicht mehr waldbaulich behandelt. Damit könnten sich die Bestandesstrukturen und die Bestandesstabilität, d.h. die Widerstandskraft gegen Sturm und Schneelast verschlechtern, sodass ihre Schutzfunktion gegen Naturgefahren reduziert werden könnte. Bestände mit unbefriedigenden Strukturen, die als instabil galten und in denen die Verjüngung fehlte, wurden einer Durchforstung unterzogen. Waldbauliche Eingriffe zur Verbesserung der mechanischen Stabilität mit dem langfristigen Ziel, die Bestände in Gebirgspflenterwälder zu überführen, werden vorgestellt. Die Wirkung der Behandlung auf die Struktur und die Stabilität wird durch Vergleiche mit benachbarten, unbehandelten Beständen mit gleichen Strukturen und gleicher Stabilität langfristig untersucht. Erste Ergebnisse über die Wirksamkeit der ausgeführten waldbaulichen Massnahmen auf die Bestandesstrukturen werden analysiert. Es scheint, dass die Variablen Schlankheitsgrad (h/d-Wert), die Horizontalverteilung der Bäume und die Bestandesdichte gute Indikatoren für die Wirksamkeit der waldbaulichen Behandlung sind.

Resumé

Vers la forêt jardinée de montagne: effets à court terme des éclaircies sur la structure des pessières subalpines

Dans les Alpes suisses, de nombreux peuplements d'épicéas n'ont jamais été traités ou n'ont plus subi d'interventions sylvicoles depuis longtemps. De ce fait, la structure et la stabilité – c'est-à-dire la résistance aux coups de vent et au poids de la neige – risquent de se dégrader au point de réduire l'effet de protection des peuplements contre les dangers naturels. Une intervention d'éclaircie a été effectuée dans les peuplements à structure insatisfaisante, jugés instables et dépourvus de rajeunissement. L'article présente des interventions visant à améliorer la stabilité mécanique et dont l'objectif à long terme consiste à transformer les peuplements en forêts jardinées de montagne. L'effet de l'opération quant à la structure et à la stabilité sera étudié à longue échéance au moyen de comparaisons avec des peuplements voisins non traités, aux caractéristiques semblables de structure et de stabilité. Les premiers résultats concernant l'efficacité des mesures sylvicoles quant à la structure des peuplements sont analysés. Le coefficient d'élanement (h/d), la répartition horizontale des arbres et la densité du peuplement semblent être de bons indicateurs de l'efficacité des interventions sylvicoles.

Traduction: CLAUDE GASSMANN

Summary

On the way to a mountain selection forest: Short-term effects of thinning on the structure of subalpine spruce forests

Numerous Norway spruce stands in the Swiss mountains have not been subjected to silvicultural intervention for many years. Indeed, some areas have never received treatment. Stand structures and stand stability, i.e. resistance to storms and snow loads, will therefore continue to decline and their protective function against natural hazards will be reduced. Stands that manifested unsatisfactory structures, or were unstable and with poor regeneration, were subjected to a thinning operation. The paper presents selected silvicultural treatments to maintain and improve the mechanical stability of the stands with the long-term goal of transforming them into mountain selection forests. The consequent effects of the treatments on structure and stand stability will be the subject of future, long-term, examination in a comparative study with adjacent stands of similar structure and stability, which will receive no treatment. Preliminary results concerning the effectiveness of the applied silvicultural measures regarding stand structure are analysed. It seems that the variables h/d ratio, spatial distribution and the stand density index are the best indicators of the effectiveness of the silvicultural treatment.

Translation: CHRISTIAN MATTER

Literatur

- ABETZ, P. 1976: Beiträge zum Baumwachstum. Der h/d-Wert – mehr als ein Schlankheitsgrad! Forst- Holzwirt 31: 389–393.
- BACHOFEN, H. 1999: Gleichgewicht, Struktur und Wachstum in Pflenterbeständen. Schweiz. Z. Forstwes. 150, 5: 157–170.
- BACHOFEN, H.; BRANG, P. 2001: Verjüngungserfolg nach Pflegeeingriff. Bündlerwald 54, 2: 20–22.
- BACHOFEN, H.; ZINGG, A. 1999: Struktur- und Stabilitätsdurchforstung in Fichtenbeständen der subalpinen Stufe. Neue waldbaukundlich-waldbauliche Untersuchungen. In: Kenk, G. (Hrsg.): Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde. Jahrestagung 1999, Volpriehausen, 19.–21. Mai 1999. Freiburg, Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. 89–101.
- BACHOFEN, H.; ZINGG, A. 2001: Effectiveness of structure improvement thinning on stand structure in subalpine Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands. – For. Ecol. Manage. 145: 137–149.
- BADOUX, E. 1946: Relations entre le développement de la cime et l'accroissement chez le pin sylvestre. Mitt. Eidg. Anst. Forstl. Versuchsw 24, 2: 405–516.
- BISCHOFF, N. 1987: Pflege des Gebirgswaldes. Leitfaden für die Begründung und forstliche Nutzung von Gebirgswäldern. Bundesamt für Forstwesen und Landschaftsschutz, Bern. EDMZ, Bern, 379 S.
- BRAASTAD, H. 1970: Et forbandsforsök med gran. Medd. Det Norske Skogsv. 105: 300–329.
- BRANG, P.; KULL, P. 1999: Verjüngungsaufnahme auf LWF-Flächen: Ziele und Methoden. Unveröffentlicht. 11 S.
- BRANG, P.; SCHÖNENBERGER, W.; BACHOFEN, H.; ZINGG, A.; WEHRLI, A. 2004: Schutzwalddynamik unter Störungen und Eingriffen: Auf dem Weg zu einer systemischen Sicht. Eidg. Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Schutzwald und Naturgefahren. Forum für Wissen 2004: 55–66.
- BRASSEL, P.; BRÄNDLI, U.-B. (Red.) 1999: Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993–1995. Birnmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Bern, Stuttgart, Wien, Haupt, 442 S.
- BURGER, H. 1939a. Kronenaufbau gleichaltriger Nadelholzbestände. Mitt. Eidg. Anst. Forstl. Versuchsw. 21: 5–58.
- BURGER, H. 1939b: Baumkrone und Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbeständen. Mitt. Eidg. Anst. Forstl. Versuchsw. 21: 147–176.
- BURSCHTEL, P. 1992: Totholz und Forstwirtschaft. Allg. Forst Z. Waldwirtsch. Umweltvorsorge, 47: 1143–1146.

- CAMINO, R. DE 1976: Zur Bestimmung der Bestandeshomogenität. Allg. Forst- Jagdztg. 147: 54–58.
- CLARK, P.J.; EVANS, F.C. 1954: Distance to the nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations. Ecology 35, 4: 445–453.
- DANIEL, W.; STERBA, H. 1980: Zur Ansprache der Bestandesdichte. Allg. Forstztg. (Wien) 35: 155–157.
- DOBBERTIN, M. 2002: Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar. Forest snow and Landscape Research 77, 1–2: 187–205.
- DONNELLY, K. 1978: Simulation to determine the variance and edge-effect of total nearest neighbour distance. In: Simulation methods in archaeology. Hodder, I.R. (Ed.), Cambridge University Press, London, 91–95.
- FIEBIGER, G. 1978: Ursachen von Waldlawinen im Bereich der nord-östlichen Randalpen und ihre Behandlung durch forsttechnische Massnahmen. Mitteilungen aus dem Institut für Wildbach- und Lawinenverbauung an der Universität für Bodenkultur in Wien 11. Diss. Boku Wien.
- FREY, W. 1977: Wechselseitige Beziehungen zwischen Schnee und Pflanze – Eine Zusammenstellung anhand von Literatur. Mitt. Eidg. Anst. Forstl. Versuchsw. 34, 223 S.
- GENSLER, G.A. 1978: Das Klima von Graubünden. Arbeitsber. d. Schweiz. Meteorolog. Zentralanst. Zürich Nr. 77.
- GASSEBNER, H. 1986: Integrale Schutzwaldinventur im Neustift im Stubaital. Dissertationen der Universität für Bodenkultur in Wien 29, 173 S.
- HEROLD, A.; ULMER, U. 2001: Stand stability in the Swiss National Forest Inventory: assessment technique, reproducibility and relevance. For. Ecol. Manage. 145: 29–42.
- HILLGARTER F.-W. 1971: Waldbauliche und ertragskundliche Untersuchungen im subalpinen Fichtenurwald von Scatlè / Brigels. Diss. ETH-Zürich, 80 S.
- IMBECK, H. 1987: Die Lawinenschutzwirkung des Waldes. Int Symposium über die Bildung, Bewegung und Wirkungen von Lawinen. Mitt. Eidgen. Inst. F. Schnee- und Lawinenforschung 43.
- IMHOF, E. (Red.) 1965: Atlas der Schweiz. Wabern-Bern. Eidgenössische Landestopographie. 86 Bl.
- KORPEL', S. 1995: Die Urwälder der Westkarpaten. Stuttgart; Jena; New York: G. Fischer, 310 S.
- KORPEL', S. 1997: Totholz in Naturwäldern und Konsequenzen für Naturschutz und Forstwirtschaft. Forst Holz 21: 619–624.
- KRAMER, H. 1975: Erhöhung der Produktionssicherheit zu Förderung einer nachhaltigen Fichtenwirtschaft. Forstarchiv 46: 9–13.
- KRAMER, H. 1988: Waldwachstumslehre. Parey, Hamburg und Berlin, 374 S.
- LANDESHYDROLOGIE UND -GEOLOGIE, Bern (Ed.) 1992: Hydrologischer Atlas der Schweiz. EDMZ, Bern.
- LEIBUNDGUT, H. 1982: Europäische Urwälder der Bergstufe. Paul Haupt, Bern und Stuttgart, 306 S.
- LEIBUNDGUT H. 1993: Europäische Urwälder, Wegweiser zur naturnahen Waldwirtschaft. Paul Haupt, Bern und Stuttgart, 260 S.
- MATTHAEI, J. 1980: Schneebruchuntersuchungen in unterschiedlich durchforsteten Fichtenreinbeständen in Harz und Solling. Diplomarbeit, Göttingen. 86 S.
- MEYER-GRASS, M. 1986: Waldlawinen: Erkenntnisse aus der Umfrage 1985/86 und den Meldungen des letzten Winters. Info 2. Eidg. Inst. F. Schnee- und Lawinenforschung Weissfluhjoch-Davos.
- MÖHRING, B. 1980: Über die Zusammenhänge zwischen Baumform und Schneebruchanfälligkeit bei Fichte. Diplomarbeit, Göttingen. 77 S.
- OTT, E.; FREHNER, M.; FREY, H.-U.; LÜSCHER, P. 1997: Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortsgerechte Waldbehandlung. Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 287 S.
- PRPIĆ, B. 1969: Über den Einfluss von Stammform und Standort auf die Sturmfestigkeit der Fichte. Schweiz. Z. Forstwes. 120: 145–154.
- ROTTMANN, M. 1983: Schneebruchschäden bei Fichten. Dissertation, München. 256 S.
- ROTTMANN, M. 1986. Wind und Sturmschäden im Wald. Frankfurt am Main: J. D. Sauerländer's Verlag, 128 S.
- SANDRI, A. 1993: Erfordernisse der Gebirgswaldforschung, -lehre und -fortbildung: die Sicht eines Gebirgskreisförsters. Schweiz. Z. Forstwes. 144, 6: 425–439.
- SCHÄDELIN, W. 1934: Die Durchforstung als Auslese- und Veredelungsbetrieb höchster Wertleistung. Verlag Paul Haupt, Bern, Leipzig. 96 S.
- SCHMID-HAAS, P.; BACHOFEN, H. 1991.: Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. Schweiz. Z. Forstwes. 142, 6: 477–504.
- SCHÜTZ, J.-PH. 1997: Sylviculture 2. La gestion des forêts irrégulières et mélangées. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne. 178 p.
- SCHÜTZ, J.-PH. 2001: Der Plenterwald und weitere Formen strukturierter und gemischter Wälder. Parey, Berlin, 207 S.
- SCHÜTZ, J.-P.; RÖHNISCH, F. 2003: Steuerung des Nachwuchses während der Überführung von gleichförmigen Fichten-Aufforstungsbeständen in Plenterwälder. In: Beiträge zur Jahrestagung 2003, G. Kenk (ed.): Deutscher Verband forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Freiburg i.Br.: 184–194.
- SOEST, J. VON; AYRAL, P.; SCHOBER, R.; HUMMEL, R. 1959: The standardization of symbols in forest mensuration. Iufro.
- STROBEL, G. 1997: Rottenstruktur und Konkurrenz im subalpinen Fichtenwald. Beih. z. Schweiz. Z. Forstwes. 81: 203 S.
- ZINGG, A. 1999: Genauigkeit und Interpretierbarkeit von Oberhöhen. – Cent.bl. gesamte Forstwes. 116, 1–2: 25–34.

Dank

Wir danken unseren Mitarbeitern Enrico Cereghetti, Christian Matter und Paul Imhof für die effiziente und genaue Durchführung der Feldarbeiten, unseren Kollegen an der WSL für die anregenden Diskussionen, insbesondere Edgar Kaufmann und Christian Hoffmann für die statistische Beratung und Peter Brang für die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Den beiden anonymen Reviewern danken wir für die kritischen Bemerkungen, die zu einer markanten Verbesserung des Manuskriptes führten. Ganz besonderer Dank gilt aber den Praktikern in den Forstdiensten der Kantone und der Gemeinden, in denen wir unsere Versuche durchführen können.

Autoren

HANSHEINRICH BACHOFEN, dipl. Forsting. ETH, Abteilung Strategien Waldentwicklung, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf. E-Mail: bachofen@wsl.ch.
ANDREAS ZINGG, dipl. Forsting. ETH, Abteilung Strategien Waldentwicklung, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf. E-Mail: andreas.zingg@wsl.ch.