Nachhaltige Verjüngung in ungleichförmigen Beständen

Hansheinrich Bachofen Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*

Sustainable recruitment in uneven aged stands

Sustainable recruitment is necessary in uneven aged and inhomogeneous forest stands (selection forests, group plenter forests, continuous cover forests) to guarantee long-lasting structure. In protection forests, an abundant tree regeneration is of utmost importance. If the regeneration rate is small, the protection function will eventually be at risk. Today, adequate methods are missing that precisely estimate self-sustaining regeneration rates. Therefore, in this study the actual state of regenerating trees was assessed in monitoring plots at various altitudes. The results can be considered as generalised ranges of sustained regeneration rates. It was found that regeneration rates in selection forests at higher altitudes were lower than in more productive forests at lower altitudes. According to theoretical considerations, mortality in youth forests is dependent on height growth. It follows that mortality of regenerating trees in less productive, balanced selection forests is smaller than in more productive ones.

Keywords: All-sized stands, selection forest, mountain selection forest, regeneration, stem distribution in young growth, mortality in young stands

doi: 10.3188/szf.2009.0002

*Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail hansheinrich.bachofen@wsl.ch

Ohne ausreichende, räumlich gut verteilte, überlebensfähige Verjüngung verschlechtert sich die Struktur stufig aufgebauter, ungleichaltriger Bestände (Plenterwälder, Gebirgsplenterwälder, Dauerwälder) mit der Zeit. In Schutzwäldern kann das bedeuten, dass der nachhaltige Schutz gegen Naturgefahren langfristig nicht gewährleistet ist (Bachofen & Zingg 1999, 2005, Dvorak & Bachmann 2001). Weil die Verjüngung dieser Wälder sehr langsam vor sich geht, ist es besonders wichtig, Verjüngungsprobleme frühzeitig zu erkennen, um notwendige Massnahmen treffen zu können. Bis heute fehlen leider zuverlässige Methoden, um abzuschätzen, ob die Verjüngung in solchen ungleichaltrigen Beständen langfristig genügt (Brang & Duc 2002).

Das Prinzip der Plenterung wie auch das Plentergleichgewicht und seine Spannweite sind weitgehend untersucht (Prodan 1949, Schütz 2001, 2002). Zur Verjüngung in Plenterwäldern gibt es bisher nur wenige Untersuchungen (Duc 1991, 2002, Hasenauer & Kindermann 2002), obwohl langjährige Datenreihen ungleichaltriger Bestände auf verschiedenen Standorten verfügbar sind (Bachofen 1999, Zingg & Duc 1998). Ein Grund dafür ist die meist verwendete Kluppschwelle: Je höher sie angesetzt ist, desto später werden zahlenmässige Hinweise auf einen Mangel an Nachwuchs sichtbar (Schütz 2001).

Ziel der hier vorgestellten Studie ist es, den Verjüngungszustand verschiedener ertragskundlicher Plenterversuchsflächen (Fallstudien) auf verschiedenen Standorten darzustellen und daraus eine Bandbreite der nachhaltigen Verjüngung in ungleichaltrigen, ungleichförmigen Beständen abzuleiten. Die Kenntnis dieser Werte kann für die nachhaltige Bewirtschaftung von ungleichaltrigen Wäldern mit Schutzfunktion entscheidend sein.

Ausgehend von unseren realen Jungwuchsdaten soll mit Modellüberlegungen versucht werden, die Entwicklung des Jungwuchses in Plenterbeständen und auch in unbehandelten ungleichförmigen Beständen besser zu verstehen. Es werden insbesondere die Stammzahlverteilung und die Mortalität pro Jahr und Höhenklasse betrachtet.

Material und Methoden

Die untersuchten Bestände Le Chenit, Obersaxen, Toppwald und Schallenberg-Rauchgrat werden seit Jahrzehnten als Plenterwälder bewirtschaftet. Basadingen, eine ehemalige Mittelwaldfläche mit einem hohen Nadelholzanteil, wird ebenfalls seit Jahrzehnten mit plenterartigen Durchforstungen als Dauerwald behandelt. Alle diese Flächen sind

Abb 1 Die untersuchten Plenterversuchsflächen und die Vergleichsfläche Oberhünigen.

nahe einem Plentergleichgewicht. Das heisst, in jeder Durchmesserklasse finden sich so viele Bäume, dass aufgrund des Zuwachses genügend Bäume in

die nächsthöhere Stufe einwachsen können, um dort die Entnahmen, die natürlichen Abgänge und die aus der Stufe auswachsenden Bäume (Auswuchs) zu ersetzen (Schütz 2001). Zum Vergleich und zum Ausloten der Bandbreite der effektiv vorhandenen Verjüngung in ungleichförmigen Beständen dient ausserdem die Versuchsfläche Oberhünigen, ein ehemals gleichförmiger, einschichtiger Baumholzbestand aus Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) und Tanne (*Abies alba* Mill.), der seit 1985 langsam in Plenterwald überführt wird (Abbildung 1, Tabelle 1).

Wie unterschiedlich die untersuchten ungleichförmigen Bestände sind, wird aus den Tabellen 1 und 2 ersichtlich. Neben den wichtigsten Daten für den verbleibenden Bestand sind auch Angaben über die letzte Nutzung und über den Zuwachs aufgeführt.

In jeder Fläche wurde die Verjüngung in einem quadratischen Netz mit zweistufigen Stichproben aufgenommen (Tabelle 3). Die Maschenweite wurde so gewählt, dass in jede Fläche mindestens 30 Stichprobenflächen fielen. Um die Flächenzent-

Name	Höhe über Meer	Fläche (ha)	Bestand/Waldgesellschaft	Erste Aufnahme	Bestand/Verjüngung
Le Chenit	1350	1.97	Fi-Ta-Plenterwald mit Laubholz Aspleno-Piceetum (EK 48) und Sorbo-Aceretum (EK 23)	1926	Alter Plenterbestand. Die Tanne ist im Allgemeinen qualitativ schlecht und wenig vital, sie wird aber geschont, da sich in ihrem Bereich gerne Fichtenverjüngung einstellt.
Obersaxen 01 (mit Eingriff)	1720	1.01	Fi-Gebirgsplenterwald Waldgesellschaft noch nicht erhoben	2006	Gebirgsplenterwald. Letzter Eingriff vor ca. 25 Jahren. Die Verjüngung wird heute als knapp ausreichend beurteilt.
Obersaxen 09 (ohne Eingriff)	1720	1.22	Fi-Gebirgsplenterwald Waldgesellschaft noch nicht erhoben	2005	Vergleichsbestand zur Fläche Obersaxen 01. Letzter Eingriff ca. 1980.
Toppwald 01	970	1.78	Fi-Ta-(Bu-)Plenterwald Abieti-Fagetum elymetosum (EK 18), Myrtillo-Abietetum Lysimachia-Variante Quercu-Abietetum sphagnetosum, Carex pilulifera-Var. Myrtillo-Abietetum, typische Variante (alle EK 46)	1906	Alter Plenterbestand. Seit 1977 langsamer Vorratsabbau bis auf ca. 400 m ³ /ha. Seit 1977 vorsichtige Förderung von neuen Verjüngungsgruppen.
Toppwald 02	970	1.24	Fi-Ta-(Bu-)Plenterwald Wie Toppwald 01	1906	Wie Toppwald 01.
Schallenberg-Rauchgrat	1080	2.50	Fi-Ta-Plenterwald Abieti-Fagetum festucetosum (EK 18) – luzuletosum (EK 19) – elymetosum (EK 18)	1931	Alter Plenterbestand, der seit etwa 1900 planmässig bewirtschaftet wird. Die Tanne ist hier im Optimum. Die Tanne im Jungwuchs muss geschützt werden, damit sie überleben kann.
Basadingen	450	1.73	Dauerwald: Laub- und Nadelholz (Vergleichsfläche), Waldgesellschaft noch nicht erhoben	2001	Ehemaliger Mittelwald, der seit ca. 1938 mit plenterartigen Durchforstungen bewirtschaftet wird. Der Nachwuchs stammt fast ausschliesslich aus Naturverjüngung.
Oberhünigen	1045	0.40	Fi-Ta-Überführungsbestand (Vergleichsfläche) Myrtillo-Abietetum, typische Variante (EK 46)	1912	Der Bestand ist aus einer Aufforstung nach Kahlschlag hervorgegangen. Seit 1985 wird er langsam zu Plenterwald überführt. Die Tanne muss im Jungwuchs geschützt werden.

Tab 1 Charakterisierung der untersuchten Bestände. Waldgesellschaften (EK) nach Ellenberg & Klötzli (1972), Bestandesbeschreibungen: Archiv Forschungseinheit Walddynamik.

Tab 2 Bestandesdaten (Hektarwerte der letzten Aufnahme).
* erst eine Aufnahme,
** Aufnahme folgt 2008.

	Le Chenit	Obersaxen 01 (mit Eingriff)	Obersaxen 09 (ohne Eingriff)	Toppwald 01	Toppwald 02	Schallenberg- Rauchgrat	Basadingen	Oberhünigen
Aufnahmejahr	2004	2004	**	2001	2001	2003	2003	2001
Verbleibender Bestand								
Stammzahl (N/ha)	460	461	---	539	300	428	353	422
Grundfläche (m²/ha)	23.9	30.9	---	34.3	26.6	28.9	22.3	44.4
Derbholzvolumen (m³/ha)	237	379	ca. 680	437	345	380	292	578
Nutzung								
Stammzahl (N/ha)	61	130	0	53	43	64	86	80
Grundfläche (m²/ha)	6.9	22.7	---	9.3	8.3	9.8	7.1	12.5
Derbholzvolumen (m³/ha)	78	315	---	131	115	140	98	167
Zuwachs								
Zuwachs an Derbholzvolumen (m³/ha/J)	5.4	ca. 6.0*	ca. 6.0	14.5	9.4	13.4	11.2	8.9

ren wurden in Kreisen von 2.52 m Radius (= 20 m² Fläche) alle Bäume ≥ 20 cm Höhe und < 8 cm Brusthöhendurchmesser (BHD) einzeln mit der Höhe in Zentimetern und BHD in Millimetern aufgenommen (Brang & Kull 1999).

Die Bäume mit BHD ≥ 8 cm sind flächendeckend erfasst und situiert (Bachofen & Zingg 2001). In einem innerhalb des Kreises gelegenen Quadrat (1 × 1 m) wurden zusätzlich alle Bäume erfasst, die mindestens ein Jahr alt und kleiner als 20 cm waren (Bachofen 2002). Die Verjüngungsaufnahme erfolgte bis jetzt einmal.

Um die Dynamik im Jungwuchs besser verstehen zu können, sind Angaben zur Mortalität unerlässlich. Weil für die Jungwüchse erst einmalige Aufnahmen vorliegen, wurde dazu ein einfaches Modell entwickelt:

1. Es wurde angenommen, dass sich die Jungwüchse der untersuchten Bestände, analog dem kluppierten Baumbestand, in einem dauernden Gleichgewicht befinden. Die Stammzahlverteilung bleibt im Modell immer gleich.
2. Mit dieser Annahme gilt die Gleichgewichtsbedingung für Plenterbestände: Einwüchse = Auswüchse + Ausfälle (Mortalität). Die Mortalität ist also die Differenz der Einwüchse pro Höhenklasse minus die Auswüchse.
3. Nach erst einer Jungwuchserhebung ist die Anzahl der Einwüchse und Auswüchse pro Jahr noch nicht bekannt. Im Modell wurde darum sehr vereinfacht angenommen, alle Jahreshöhentriebe der Jungwuchspflanzen seien gleich gross. Einwüchse und Auswüchse und damit die Mortalität lassen sich mit dieser Annahme leicht berechnen. So wachsen z. B. bei 20 cm langen Höhentrieben pro Jahr alle Bäume einer 20-cm-Höhenklasse in die nächste Klasse aus.

Fläche	Aufnahmejahr	Stichprobenabstand (m)	Anzahl Stichproben	Stammzahl		
				0.0–19.9 cm Höhe	20.0–129.9 cm Höhe	≥ 130.0 cm Höhe, < 8.0 cm BHD
Le Chenit (alle Baumarten)	2002	20.00	50	12 400	5 570	1 250
Le Chenit (ohne Sorbus)	2002	20.00	50	8 400	3 300	810
Le Chenit (Fichte und Tanne)	2002	20.00	50	800	410	220
Obersaxen 01 (mit Eingriff)	2004	14.14	50	1 887	651	443
Obersaxen 09 (ohne Eingriff)	2004	14.14	60	2 373	686	153
Toppwald 01	2001	20.00	45	17 333	3 189	700
Toppwald 02	2001	20.00	30	6 667	2 283	550
Schallenberg-Rauchgrat	2005	20.00	65	11 515	4 197	1 167
Basadingen	2003	20.00	41	35 122	7 646	1 622
Oberhünigen	2001	10.00	42	25 952	3 429	345

Tab 3 Verjüngungsaufnahme in den untersuchten Flächen. Stammzahl in N/ha.

Resultate, Diskussion

Stammzahlverteilung

Im Jungwuchs, unterhalb der Kluppschwelle, nehmen die Stammzahlen mit zunehmender Pflanzenhöhe rasch ab (Kurth 1946, Assmann 1961, Kramer 1988, Wenk et al 1990, Bachofen 2005). Alle Jungwüchse in den untersuchten Plenterversuchsflächen (Abbildung 2) zeigen ohne Ausnahme eine typische, umgekehrt J-förmige Stammzahlverteilung (Westphal et al 2006), die viel steiler verläuft als die umgekehrt exponentielle Kurve der Bäume ≥ 8.0 cm BHD (Bachofen 1999). Das deutet darauf hin, dass in allen Flächen ähnliche Mechanismen für die Stammzahlabnahme (Mortalität) mit der Baumhöhe gelten wie im kluppierten Bestand für die Stammzahlabnahme mit dem BHD.

Abb 2 Stammzahlverteilung im Jungwuchs der untersuchten Plenterwaldflächen. Basadingen: $y = 51462.7x^{-1.955}$ $R^2 = 0.930$, Toppwald 01: $y = 6951.4x^{-2.051}$ $R^2 = 0.928$, Toppwald 02: $y = 4996.4x^{-1.974}$ $R^2 = 0.909$, Obersaxen 01: $y = 900.6x^{-1.398}$ $R^2 = 0.872$, Obersaxen 09: $y = 1247.7x^{-1.794}$ $R^2 = 0.928$, Le Chenit: $y = 352.8x^{-1.168}$ $R^2 = 0.808$, Schallenberg-Rauchgrat: $y = 11296.1x^{-2.111}$ $R^2 = 0.952$.

Abb 3 Stammzahlen in den untersuchten Plenterwaldflächen nach Höhenlage und Baumhöhenklasse. 0.0–19.0 cm: $y = 102571.101e^{-0.0025x}$ $R^2 = 0.694$, 20.0–129.9 cm: $y = 20796.731e^{-0.0021x}$ $R^2 = 0.760$, ≥ 130.0 cm: $y = 3153.812e^{-0.0015x}$ $R^2 = 0.652$.

Höher gelegene Flächen auf schlechteren Standorten haben meist eine kleinere Jungwuchsstammzahl pro Hektare als tiefer gelegene Flächen auf wüchsigeren Standorten (Abbildungen 2 und 3, Burschel et al 1977). Im gutwüchsigen Dauerwald von Basadingen gibt es über 35 000 Pflanzen/ha unter 20 cm Höhe, während im Fichten-Gebirgspalterwald Obersaxen in der gleichen Klasse nur rund 2000 Bäume/ha stocken. In der Klasse 340–359 cm sind in Basadingen mit $N = 146$ immer noch ca. 17 Mal mehr Bäume pro Hektare zu finden als in Obersaxen mit $N = 9$ (Abbildung 2). In allen untersuchten Flächen wird die Verjüngung vom zuständigen lokalen Forstdienst gutachtlich als ausreichend beurteilt.

In Le Chenit gibt es einen Nebenbestand aus Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.), Buche (*Fagus sylvatica* L.), Sorbus (*Sorbus aria* (L.) Crantz und *Sorbus chamaemespilus* (L.) Crantz), der sich gut verjüngt. Da diese Baumarten aber kaum in die Oberschicht vorstossen, werden in Abbildung 3 (Jungwuchsstammzahl nach Höhe) nur Fichte und Tanne dargestellt.

In den betrachteten Beständen besteht ein tendenzieller Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen jährlichen Gesamtzuwachs und der Jungwuchsstammzahl nach den drei ausgewählten Höhenklassen: Gut wüchsige Plenterbestände haben eine stammzahlreichere Verjüngung als schlechter wüchsige (Abbildung 4). Die Verjüngung im Plenterwald kann auch bei nachhaltig gut aufgebauten Beständen schubweise mit relativ grossen Unterbrüchen nachkommen, ohne dass die Bestandesstruktur dadurch gefährdet sein muss (Majcen 1996). Ausserdem ist in Perioden mit günstigen Verhältnissen für die Verjüngung und mit kleinerer Mortalität weniger Verjüngung notwendig als in Perioden mit ungünstigen Verhältnissen und höherer Mortalität. Hätte sich in unseren Plenterversuchsflächen nicht immer genügend Verjüngung etabliert, hätten sich die guten Strukturen nicht langfristig, d. h. während Jahrzehnten, erhalten können.

Bandbreite der Verjüngung

In Tabelle 4 und Abbildung 5 sind die erhobenen Jungwuchsdaten sowie die von Duc (1991) zur Sicherung des Nachwuchses angegebene notwendige Stammzahl für Emmentaler Plenterwälder mittlerer Bedingungen abgebildet. Weil alle hier untersuchten Plenterwaldflächen gut aufgebaut sind und sich seit Jahrzehnten nahe einem Gleichgewichtszustand befinden, können die Stammzahlen des vorhandenen Jungwuchses als Annäherung an eine nachhaltige Verjüngung in ungleichförmig aufgebauten Beständen betrachtet werden.

In den untersten Höhenklassen (vom ≥ 1 -jährigen Sämling bis < 20 cm Höhe) schwanken die Stammzahlen der vorhandenen Verjüngung zwi-

Abb 4 Stammzahl pro Hektare nach durchschnittlichem jährlichem Gesamtwuchs und nach Baumhöhenklasse. 0.0–19.0 cm: $y = 251.383e^{0.368x}$ $R^2 = 0.792$, 20.0–129.9 cm: $y = 115.832e^{0.319x}$ $R^2 = 0.890$, ≥ 130.0 cm: $y = 75.426e^{0.231x}$ $R^2 = 0.776$.

schen etwa tausend und mehreren Zehntausend pro Hektare (Tabelle 4 und Abbildung 5). Die Bandbreite nimmt mit zunehmenden Baumhöhen oder zunehmendem BHD ab, sie ist in unserer Untersuchung grösser als bei Duc (1991), weil die Standorte viel stärker variieren.

Nach guten Jahren (z. B. Samenjahren) sind die Individuenzahlen in der kleinsten Höhenklasse sehr gross. Obwohl auch die Mortalität hoch ist, wachsen genügend Pflanzen in die höheren Klassen ein, und Defizite schlechter Jahre werden ausgeglichen. Nach schlechten Jahren können alle vorhandenen Pflanzen mit Höhen < 20 cm in die nächste Klasse einwachsen oder absterben – die Stammzahl der Pflanzen < 20 cm Höhe kann vorübergehend gegen null sinken.

Gleichgewicht, Stammzahlabnahme, Mortalität

Baumbestand ≥ 8.0 cm BHD

Die Stammzahlverteilungen der Bäume ≥ 8.0 cm BHD in bewirtschafteten, ungleichförmigen Beständen in einem Gleichgewichtszustand entsprechen in einer ersten Annäherung einer umgekehrt exponentiellen Verteilung (Leak 2001, Schütz 2001, De Liocourt 1898, Meyer 1952). Vergleichbare Verteilungen finden sich auch in Urwaldbeständen (Korpel 1995). Gemäss Westphal (2006) werden sie ökologisch dadurch erklärt, dass die Mortalitätsraten in allen Durchmesserklassen gleich sind. Dies trifft in Wirklichkeit aber kaum zu. Damit ein Gleichgewicht bestehen bleibt, müssen vielmehr die durchschnittlichen Einwuchs-, Auswuchs-, Mortalitäts- und in bewirtschafteten Wäldern auch die Nutzungsraten über die Zeit gleich bleiben. Die Einwuchs- und Auswuchsraten steigen mit den Durchmesserklassen und können in den höheren Klassen wieder abnehmen. Die Nutzungsraten nehmen mit den Durchmesserklassen zu (Bachofen 1999, Leak 2001, Schütz 2001). In nicht bewirtschafteten Wäldern nehmen die durchschnittlichen Mortalitätsraten in den oberen Durchmesserklassen zu (Bachofen 1999, Leak 2001). Im mittleren Durchmesserbereich sind die Wachstumsbedingungen für die Bäume oft besonders gut, die Bäume wachsen hier schneller durch die Klassen durch, die Stammzahlen in den entsprechenden Klassen sind deshalb kleiner, als bei gleichmässigem Wachstum zu erwarten wäre, und die Nutzungsraten sind in diesem Bereich etwas kleiner. In diesen Fällen bilden sich sigmoide Stammzahlverteilungskurven aus (Goff & West 1975, Lorimer & Frelich 1984, Leak 2001, Schütz 2001, 2006).

In Plenterwäldern ist die Mortalität der Bäume ≥ 8.0 cm BHD klein, sie beträgt nur etwa null bis drei Prozent pro Jahr. Abweichungen der Stammzahlen von einem angestrebten Gleichgewicht werden vor allem durch die Plentereingriffe korrigiert, die je nach BHD-Klasse mit ca. einem bis über vierzehn Prozent pro Jahr deutlich höher sind als die Mortalität.

Höhen- bzw. BHD-Klasse	Notwendige Stammzahl nach Duc (1991)	Erhobene Stammzahl auf den Versuchsflächen				
		Bandbreite für Fi- und Fi/Ta-Plenterwälder*	Le Chenit (Fichte und Tanne)	Le Chenit (alle Baumarten)	Basadingen	Oberhünigen
H 0.0–19.9 cm	keine Angaben	800–17300	800	12 400	35 100	25 952
H 20.0–49.9 cm	keine Angaben	210–2560	210	3 200	18 732	2 310
H 50.0–89.9 cm	50–460	150–770	150	1 750	8 146	845
H 90.0–129.9 cm	40–280	50–420	50	620	3 707	274
BHD 0.0–3.9 cm	110–930	80–400	80	970	6 490	298
BHD 4.0–7.9 cm	100–530	40–250	120	–	49	36

Tab 4 Stammzahl nach Höhen- und BHD-Klasse für ausgewählte Versuchsflächen sowie notwendige Stammzahl für Emmentaler Plenterwälder (mittlere Bedingungen) nach Duc (1991). *Bandbreite: minimale und maximale Stammzahl der Untersuchungsflächen Obersaxen 01 und 09, Schallenberg-Rauchgrat, Toppwald 01 und 02, Le Chenit (Fichte und Tanne).

Abb 5 Bandbreite der vorhandenen Verjüngung in den untersuchten Plenterversuchsflächen und Vergleich mit der nach Duc (1991) notwendigen Verjüngung in Emmentaler Plenterwäldern mittlerer Bedingungen. Gut: gute Standorte im Mittelland, hoher Laubholzanteil (z. B. Dauerwald Basadingen), mittel: mittlere Standorte im Mittelland (z. B. Toppwald); schlecht: schlechte Standorte im Mittelland und Gebirgsstandorte (z. B. Obersaxen).

lität (Bachofen 1999, Schütz 2001). In Naturwäldern ist die Mortalität gemäss Leak (2001) variabel und schwierig voraussagbar. Die langfristige durchschnittliche Mortalität, auf genügend grossen Flächen ab rund 25 ha, entspricht ungefähr der Summe von Nutzung und Mortalität in einem Plentergleichgewicht, falls keine grossflächigen Störungen auftreten (Korpel 1982, Piovesan 2005, Leak 2001). Sie beträgt in den kleinen Durchmesserklassen null bis etwa zwei Prozent und kann bis in die obersten Klassen auf Werte von über zehn Prozent pro Klasse und Jahr steigen.

Baumbestand < 8.0 cm BHD

Das Gleichgewichtsmodell für ungleichförmige Bestände nach Schütz (2001) gilt auch für den Jungwuchs: Die Stammzahl pro Höhenklasse bleibt über die Jahre gleich, analog der Stammzahl pro BHD-Klasse des kluppierten Bestandes (Bachofen 2005, 1999, Lundqvist 1991). Bei der Kluppschwelle erreicht sie die Anfangsstammzahl von ca. 100 bis 350 Bäumen pro Hektare in der ersten (8–12 cm) BHD-Klasse (Schütz 2001). Damit ein Gleichgewicht erhalten bleibt, muss die Summe aus eventuellen Eingriffen und mortalitätsbedingten Abgängen mit der Höhe der Bäume unterhalb der Kluppschwelle rasch abnehmen (Abbildung 2).

Zum Nachwuchs und insbesondere zu den Eingriffen im Nachwuchs des Plenterwaldes existieren fast keine quantitativen Angaben, sondern bloss qualitative Beschreibungen (Leibundgut 1978, Schütz 1989, WSL¹). Gemäss Duc (2002) erfolgt in

Fichten-Tannen-Buchen-Plenterwäldern des Neuenburger Juras zwischen 800 und 1000 m ü. M. die Jungwaldpflege vorwiegend im Bereich von 2.5 bis 16.3 cm BHD. Der Eingriff in der BHD-Stufe 2.5–4.9 cm beträgt im Durchschnitt der 18 untersuchten Flächen rund 23 von total 160 Bäumen pro Hektare, was bei einem angenommenen zehnjährigen Nutzungsturnus 1.4% der Stammzahl pro Jahr in dieser Klasse entspricht. In den Klassen unter 2.5 cm BHD wird kaum eingegriffen, in jenen über 16.3 cm BHD liegen die durchschnittlichen Eingriffsstärken in einer Grössenordnung von gut 1% der Stammzahl pro Klasse und Jahr.

Im Dauerwald Basadingen wird laut Auskunft des Betriebsleiters Walter Ackermann (7.11.2006) im Nachwuchs ausschliesslich eine sehr arbeitsexensive Pflege und Mischungsregulierung gemacht (eine bis drei Stunden Aufwand pro Hektare alle sechs Jahre).

Die Mortalität gemäss unserem Modell kann in den kleinsten Höhenklassen bis etwa 60 cm ohne Weiteres deutlich über 100% der Anfangsstammzahl pro Jahr und Klasse betragen, weil in jeder Klasse laufend Bäume aus den kleineren, stammzahlreichen Klassen einwachsen und ebenfalls zum Teil absterben. Die Anzahl der Einwüchse ist, dem immer flacher werdenden Kurvenverlauf entsprechend, bedeutend grösser als die Anzahl der Auswüchse. Mit zunehmender Höhe der Bäume strebt die jährliche Mortalität gegen kleine einstellige Prozentwerte pro Höhenklasse (Abbildung 6).

Die Kurven der Mortalitätsraten für die ausgewählten Beispiele Basadingen und Toppwald 01 decken sich, bei angenommenem, überall gleichem Höhenzuwachs pro Jahr, nahezu (Abbildung 6). Die Mortalitätsrate im Modelljungwuchs eines ungleichförmigen Bestandes im Gleichgewicht ist von der absoluten Stammzahl pro Baumhöhenklasse also nur wenig, vom Höhenzuwachs hingegen deutlich abhängig.

Bei angenommenen 10-cm-Jahrestrieben in allen Höhenklassen beträgt die Mortalität in der Höhenklasse 20–39 cm für die Verteilung Toppwald 01 125% pro Jahr. Ab 3.8 m Baumhöhe sinkt sie unter 5% pro Klasse und Jahr. Sind die Jahrestriebe im Modell aber nur 2 cm lang, so muss die Mortalität in der Klasse 20–39 cm nur noch 25% und ab 3.8 m Baumhöhe bereits weniger als 1% pro Jahr und Klasse betragen, damit das Gleichgewicht erhalten bleibt.

Die Mortalität in den einzelnen Höhenklassen nimmt annähernd linear mit der Stammzahl pro ha in den Höhenklassen ab (ohne Abbildung).

Im idealen Gleichgewichtsmodell für den Jungwuchs (mit angenommenen gleich grossen Höhentrieben in allen Höhenklassen) in Plenterwäldern auf schlechteren Standorten ist die jährliche Mortalität, in Prozenten der Anfangsstammzahl pro

¹ Bestandesbeschreibungen der ertragskundlichen Versuchsflächen (Archiv Forschungseinheit Walddynamik)

Abb 6 Stammzahlverteilung (N/ha und Höhenklasse) und Mortalität (% pro Jahr und Höhenklasse) für Basadingen und Toppwald 01.

Klasse ausgedrückt, überraschenderweise kleiner als in tiefer gelegenen Plenterwäldern auf guten Standorten. Auf den schlechteren Standorten sind die Höhenzuwächse pro Jahr viel kleiner, damit sind die Einwüchse und auch die Auswüchse ebenfalls kleiner als bei grösseren Höhenzuwächsen. Das bedeutet, dass, in absoluten Zahlen ausgedrückt, weniger Bäume ausfallen dürfen, wenn das Gleichgewicht gewährleistet bleiben soll. Das bestätigt die Erfahrung, dass ein Gleichgewicht im Gebirgswald viel labiler ist als in tieferen Lagen, weil die Bäume im Jungwuchs nicht im Überfluss vorhanden sind und Ausfälle nicht so rasch kompensiert werden können. Das Überleben des einzelnen jungen Baumes hat im Gebirgsplenterwald eine viel grössere Bedeutung als im Wald tieferer Lagen. Unsere Jungwuchsdaten aus verschiedenen, ungleichförmigen Beständen bestätigen diese Überlegungen (Abbildung 5).

Die Höhentriebe im Jungwuchs sind in Wirklichkeit weder in allen Klassen noch innerhalb der Klassen gleich gross (Bachofen 2005). In ungleichförmigen Wäldern bestehen zudem grosse Unterschiede zwischen unterdrückten und freigestellten Bäumen sowie zwischen den verschiedenen Baumarten. Nehmen die Höhentriebe im Modellbeispiel Basadingen von der kleinsten zur grössten Höhenklasse von 5 cm bis 20 cm linear zu, verläuft die Mortalitätskurve flacher als die Kurve für gleichmässig

5 cm lange Höhentriebe und nähert sich der Kurve für 20 cm lange Höhentriebe an (ohne Abbildung). Wenn die Höhentriebe nach den Höhenklassen gemäss einer nach oben konvexen Kurve verlaufen, die in der kleinsten Klasse mit 5 cm langen Trieben beginnt, über ein Maximum von 20 cm wieder auf 5 cm bei der grössten Höhenklasse sinkt, ist die Mortalitätskurve in einer Abbildung 6 entsprechenden, halblogarithmischen Darstellung leicht s-förmig, mit einem annähernd horizontalen Verlauf im Bereich von 380 bis 670 cm Baumhöhe (Goff & West 1975, Leak 2001).

Schlussfolgerungen

In Schutzwäldern ist eine langfristig nachhaltige Verjüngung für die Erhaltung der erwünschten Schutzwirkung des Waldes unerlässlich. Allerdings ist zu beachten, dass nicht eine ideale oder nachhaltige Stammzahlverteilung nach Durchmesser- oder Höhenklassen entscheidend ist, sondern die dauernde Stabilität. Zuwächse und Vorräte der Bestände werden angesichts der speziellen Anforderungen im Schutzwald zweitrangig oder sogar belanglos. Für das Verständnis der Dynamik der Bestände sind sie aber trotzdem wichtige und einfach messbare Parameter.

Fragen des Nachwuchses müssen längerfristig und räumlich differenziert gesehen werden (Fajardo et al 2006, Grassi et al 2003). Die Verjüngungsdaten aus unseren Versuchsflächen liefern Anhaltspunkte für die anzustrebende Verjüngung in ungleichförmigen Wäldern. Für ein genaueres, vertieftes Verständnis der Dynamik des Jungwuchses genügen unsere Aufnahmen ohne Wiederholung nicht. Es sind zusätzliche, vor allem auch langfristige und wiederholte repräsentative Beobachtungen und eventuell jährliche Höhen-, Höhentrieb- und BHD-Messungen unerlässlich. Diese erlauben es, die vorliegenden Resultate und Modellüberlegungen zu präzisieren.

Selbstverständlich können, auch in ungleichförmigen Schutzwäldern im Gebirge, die gewünschten Wirkungen des Waldes auch erfüllt werden, wenn die Bestände nicht dauernd in einem Gleichgewichtszustand sind. Falls aber eine dauernde, flächendeckende Bestockung erwünscht oder notwendig ist, wird man in vielen Fällen (gebirgs-)plenterwaldähnliche Bestandesstrukturen anstreben. In diesen Fällen und auch in ungleichförmigen, nicht bewirtschafteten Wäldern dienen unsere Überlegungen dazu, die Dynamik der Verjüngung besser zu verstehen.

Eingereicht: 9. Januar 2008, akzeptiert (mit Review): 26. März 2008

Abb 7 Verjüngung in der Versuchsfläche Schallenberg-Rauchgrat. Foto: Ulrich Wasem, WSL

Dank

Ich danke Regina Baumann, Mathieu Bouchard, Enrico Cereghetti, Regina Koch, Christian Matter, Taras Parpan, Bernhard Ramp, Bernhard Thiel, Michèle Thinnes, Ulrich Wasem und Benno Zingg, ohne deren grossen Einsatz die umfangreichen Aufnahmearbeiten nicht möglich gewesen wären. Den lokalen Forstdiensten danke ich für die gute Zusammenarbeit und Andreas Zingg für die Zusammenstellung aller ertragskundlichen Daten der Versuchsflächen.

Literatur

- ASSMANN E (1961) Waldertragskunde. München: BLV. 490 p.
- BACHOFEN H (1999) Gleichgewicht, Struktur und Wachstum in Plenterbeständen. Schweiz Z Forstwes 150: 157–170. doi: 10.3188/szf.1999.0157
- BACHOFEN H (2002) Erfassung der Verjüngung in Versuchsflächen der Waldwachstumsforschung; Methode und erste Resultate. In: Kenk G, editor. Jahrestagung Sektion Ertragskunde, Schwarzburg, 13.–15. Mai 2002. Freiburg: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. pp. 177–184.
- BACHOFEN H (2005) Der Einfluss von Aufnahme Fehlern und Wachstumsvorgängen auf die Stammzahlverteilung in Buchennaturverjüngungen unter Altholzschirm. Vergleich eines naturnahen Buchenbestandes im Sihlwald, Schweiz, mit einem Bestand im Buchenurwald Uholka, Ukraine. Schweiz Z Forstwes 156: 365–371. doi: 10.3188/szf.2005.0365
- BACHOFEN H, ZINGG A (1999) Struktur- und Stabilitätsdurchforstung in Fichtenbeständen der subalpinen Stufe. Neue waldwachstumskundlich-waldbauliche Untersuchungen. In: Kenk G, editor. Jahrestagung Sektion Ertragskunde, Volpriehausen, 19.–21. Mai 1999. Freiburg: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. pp. 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.
- BACHOFEN H, ZINGG A (2005) Auf dem Weg zum Gebirgsplechterwald: Kurzzeiteffekte von Durchforstungen auf die Struktur subalpiner Fichtenwälder. Schweiz Z Forstwes 156: 456–466. doi: 10.3188/szf.2005.0456
- BRANG P, DUC P (2002) Zu wenig Verjüngung im Schweizer Gebirgs-Fichtenwald: Nachweis mit einem neuen Modellansatz. Schweiz Z Forstwes 153: 219–227. doi: 10.3188/szf.2002.0219
- BRANG P, KULL P (1999) Verjüngungsaufnahmen auf LWF-Flächen: Ziele und Methoden. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch. anst. Wald Schnee Landsch, unveröffentl. 11 p.
- BURSCHEL P, LÖW H, METTIN C (1977) Waldbauliche Untersuchungen in den Hochlagen des Werdenfelser Landes. München: Forstliche Forschungsanstalt, Forschungsbericht 37. 193 p.
- DE LIOCOURT F (1898) De l'aménagement des sapinières. Bull. Soc. For. Franche-Comté et Belfort. 4: 396–409, 645.
- DUC P (1991) Untersuchungen zur Dynamik des Nachwuchses im Plenterwald. Schweiz Z Forstwes 142: 299–319.
- DUC P (2002) Zustand, Entwicklung und Pflege des Nachwuchses in Plenterwäldern des Val-de-Travers (Neuenburger Jura). Beih. Schweiz Z Forstwes 91. 243 p.
- DVORAK L, BACHMANN P (2001) Plenterwälder sind sturmfester. Wald Holz 82: 47–50.
- ELLENBERG H, KLÖTZLI F (1972) Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers. wes 48 (4): 589–930.
- FAJARDO A, GOODBURN JM, GRAHAM J (2006) Spatial patterns of regeneration in managed uneven-aged ponderosa pine/Douglas fir forests of Western Montana, USA. For Ecol Manage 223: 255–266.
- GOFF FG & WEST D (1975) Canopy-understory interaction effects on forest population structure. For Sci 21: 98–108.
- GRASSI G, MINOTTA G, GIANNINI R, BAGNARESI U (2003) The structural dynamics of managed uneven-aged conifer stands in the Italian eastern Alps. For Ecol Manage 185: 225–237.

- HASENAUER H, KINDERMANN G (2002) Methods for assessing regeneration establishment and height growth in uneven-aged mixed species stands. *Forestry* 75: 385–394.
- KORPEL Š (1982) Degree of equilibrium and dynamical changes of the forest on example of natural forests of Slovakia. *Acta Fac For Zvolen* 24: 9–30.
- KORPEL Š (1995) Die Urwälder der Westkarpaten. Stuttgart: Fischer. 310 p.
- KRAMER H (1988) *Waldwachstumslehre*. Hamburg: Paul Parey. 374 p.
- KURTH A (1946) Untersuchungen über Aufbau und Qualität von Buchendickungen. *Mitt Schweiz Anst Forstl Vers.wes* 24: 581–658.
- LEAK WB (2001) Origin of sigmoid diameter distributions. Newtown Square: US Dep Agriculture, Forest Service Northeastern Research Station, Res Pap NE-718. 10 p.
- LEIBUNDGUT H (1978) *Die Waldpflege*. Stuttgart: Haupt. 204 p.
- LORIMER CG, FRELICH LE (1984) A simulation of equilibrium diameter distribution of sugar maple (*Acer saccharum*). *Bull Torrey Botanical Club* 111: 193–199.
- LUNDQVIST L (1991) Some notes on the regeneration of Norway spruce on six permanent plots managed with single-tree selection. *For Ecol Manage* 46: 49–57.
- MAJCEN Z (1996) Coupe de jardinage et coupe de succession dans cinq secteurs forestiers. Accroissement quinquennal en surface terrière et état de la régénération. Québec : Ministère des Ressources Naturelles. 19 p.
- MEYER HA (1952) Structure, growth and drain in balanced, uneven-aged forests. *J For* 52: 85–92.
- PIOVESAN G, DI FILIPPO A, ALESSANDRINI A, BIONDI F, SCHIRONI B (2005) Structure, dynamics and dendroecology of an old-growth *Fagus* forest in the Apennines. *J Veg Sci* 16: 13–28.
- PRODAN M (1949) Die theoretische Bestimmung des Gleichgewichtszustandes im Plenterwald. *Schweiz Z Forstwes* 100: 81–99.
- SCHÜTZ JP (1989) *Waldbau III (Waldverjüngung): Der Plenterbetrieb*. Zürich: Eidg Techn Hochschule, Fachbereich Waldbau, Vorlesungsskript. 54 p.
- SCHÜTZ JP (2001) Der Plenterwald und weitere Formen strukturierter und gemischter Wälder. Berlin: Paul Parey. 207 p.
- SCHÜTZ JP (2002) Silvicultural tools to develop irregular and diverse forest structures. *Forestry* 75: 329–338.
- SCHÜTZ JP (2006) Modelling the demographic sustainability of pure beech plenter forests in Eastern Germany. *Ann For Sci* 63: 93–100.
- WENK G, VAIDOTAS A, ŠMELKO Š (1990) *Waldertragslehre*. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag. 448 p.
- WESTPHAL C ET AL (2006) Is the reverse J-shaped diameter distribution universally applicable in European virgin beech forests? *For Ecol Manage* 223: 75–83.
- ZINGG A, DUC P (1998) Beurteilung des Gleichgewichtszustandes in Plenterwaldversuchsflächen. In: Kenk G, editor. *Jahrestagung Sektion Ertragskunde*, 25.–27. Mai 1998, Kevelaer. Freiburg: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. 147–156.

Nachhaltige Verjüngung in ungleichförmigen Beständen

In ungleichaltrigen, inhomogenen Beständen (Plenterwälder, Gebirgsplenterwälder, Dauerwälder) ist eine ausreichende, gut verteilte, überlebensfähige Verjüngung unerlässlich, falls die Struktur langfristig und nachhaltig erhalten werden soll. Besonders wichtig ist eine solche Strukturhaltung mit einer genügenden Verjüngung in Schutzwäldern. Ungenügende Verjüngung kann hier bedeuten, dass der Schutz gegen Naturgefahren nicht mehr langfristig und dauerhaft gewährleistet ist. Heute fehlen zuverlässige Methoden, um abzuschätzen, ob die Verjüngung in solchen Beständen genügt. Mit Stichproben in gut aufgebauten Plenterversuchsflächen in unterschiedlichen Höhenlagen auf verschiedenen Standorten wurde der aktuelle Zustand der Verjüngung erhoben, und daraus wurden Bandbreiten für eine nachhaltige Verjüngung abgeleitet. Es zeigte sich, dass die Verjüngungsstammzahlen in höher gelegenen, weniger wüchsigen Plenterbeständen im Allgemeinen kleiner sind als in tiefer gelegenen, besser wüchsigen Beständen.

Gemäss Modellüberlegungen ist die Mortalität im Jungwuchs (Ausfallprozente pro Jahr und Höhenklasse) vom Höhenwachstum abhängig, und sie muss in den weniger wüchsigen Flächen in einem Plentergleichgewicht im Durchschnitt kleiner sein als in den besser wüchsigen Flächen.

Régénération permanente dans des peuplements irréguliers

Dans les peuplements irréguliers (forêts jardinées, forêts jardinées de montagne, forêts permanentes), une régénération suffisante, bien répartie et durable, est indispensable pour la préservation à long terme et la pérennité de la structure. Cette maintenance de la structure, accompagnée d'une régénération satisfaisante, est primordiale pour les forêts protectrices. En effet, une régénération trop pauvre signifierait que la protection contre les dangers naturels n'est plus garantie à long terme ni de façon durable. Nous manquons aujourd'hui encore de méthodes fiables pour évaluer si la régénération est suffisante dans ces peuplements. A l'aide d'échantillons sur des placettes jardinées bien structurées, situées à différentes altitudes et sur diverses stations, nous avons relevé l'état actuel de la régénération et en avons déduit des marges de fluctuation pour une régénération durable. D'où il ressort que dans les peuplements jardinés à haute altitude et moins fertiles, le nombre de tiges de régénération est en moyenne inférieur à celui des peuplements à basse altitude et aux sols plus riches.

Selon les énoncés théoriques des modèles, la mortalité chez les recrûs (pourcentage de perte par année et par classe de hauteur) dépend de l'élévation de l'altitude. De plus, en présence d'un équilibre jardiné, la mortalité moyenne chez les recrûs serait en principe plus faible sur les placettes peu fertiles que sur les surfaces plus riches.