

Kurzes Zeitfenster für die Fichtennaturverjüngung in Gebirgsnadelwäldern

Tobias Kalt^{1,2}, Petia Nikolova^{1,*}, Christian Ginzler¹, Peter Bebi³, Kirsten Edelkraut², Peter Brang¹

¹Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

²Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, ZHAW (CH)

³WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung, SLF (CH)

Abstract

In den vergangenen 30 Jahren wurden Schweizer Gebirgsnadelwälder stellenweise mit Kahlhieben verjüngt und nicht mit kleinen Lücken, wie dies bei der Gebirgspflenterung üblich ist. Wie sich die Entwicklung in den entstandenen Bestandeslücken nach 13 bis 29 Jahren präsentiert, wurde in zehn Kahlhieben in der Südostschweiz und im Tessin mit Luftbildanalysen und Stichprobeninventuren untersucht. Historische Luftbilder dienten zur Erfassung der Bestandesgeschichte und der Kronendachöffnung vor dem Schlag. Mit Stichprobeninventuren wurden die aktuelle Baumverjüngung und die Kleinstandorte inklusive Bodenbedeckung erhoben. Die Dichte der Verjüngung zwischen 10 cm Höhe und 12 cm Brusthöhendurchmesser (BHD) lag im Mittel bei 5450 St./ha, wovon 71% Fichten waren. Der hohe Mittelwert kam durch Probeflächen mit sehr dichter Verjüngung zustande. Die Fichtenverjüngung stellte sich zum Grossteil nach dem Holzschlag ein; Vorverjüngung war im Nachwuchs (130 cm Höhe bis 12 cm BHD) zu 30% vorhanden. Die Vorverjüngung war dichter in Probeflächen, in denen der Vorbestand schon aufgelichtet gewesen war. Die höchsten Dichten der Nachverjüngung traten bei mittlerer bis hoher Kronendeckung vor dem Holzschlag auf. Verdämmende Konkurrenzvegetation reduzierte die Dichte der Vor- und der Nachverjüngung. Die Präsenz von Moderholz und Baumstümpfen war mit einer höheren Verjüngungsdichte verbunden, Wildhuftierverbiss dagegen mit einer geringeren. Bei wenig Konkurrenzvegetation tritt unmittelbar nach dem Schlagen einer grossen Lücke eine Phase mit hoher Verjüngungsgunst auf, in der die Verjüngung oft gelingt. Auf Standorten hingegen, die zur Bildung einer dichten Konkurrenzvegetation neigen, stellt sich die Verjüngung nur zögerlich ein, und sie ist auf Moderholz und Baumstümpfe angewiesen.

Keywords: natural regeneration, Norway spruce, Alpine forest, stereo image analysis, competing herbaceous vegetation

doi: 10.3188/szf.2021.0156

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail petia.nikolova@wsl.ch

Der grosse Schutzwaldanteil und die topografischen Rahmenbedingungen in den Schweizer Gebirgswäldern setzen dem waldbaulichen Spielraum enge Schranken. Das Bewirtschaftungsziel ist meist ein horizontal und vertikal kleinflächig strukturierter Wald mit hoher Resistenz gegenüber natürlichen Störungen und mit möglichst kontinuierlicher Verjüngung. Mittels plenterartiger waldbaulicher Eingriffe und kleiner Verjüngungshiebe werden solche kleinflächigen Strukturen gefördert (Schönenberger & Brang 2004). Die maximale Ausdehnung der resultierenden Lücken ist in den Richtlinien zur Schutzwaldpflege naturgefahrenbezogen festgelegt (Frehner et al 2005).

Im 19. Jahrhundert wurden Gebirgswälder oft im Kahlschlagsystem genutzt. Später jedoch wurde meist nur selektiv, d.h. durchforstungsartig oder mit kleinen Verjüngungshieben, eingegriffen. In einzelne Wälder, darunter auch Schutzwälder, wurden aber in den letzten 30 Jahren auch grosse Lücken geschlagen, die teils fast 100 m breit und mehrere 100 m lang waren. Waldbaulich gesprochen sind dies Kahlhiebe. Der Anreiz dafür waren das walddpolitische Bestreben, die Holznutzung zu steigern (BAFU, BFE, SECO 2017), und die Ansicht, damit die Holzerntekosten vermindern zu können (Brang et al 2017).

Seit 2013 untersuchen wir die Auswirkungen solch grosser Lücken auf den Holzzuwachs in Fich-

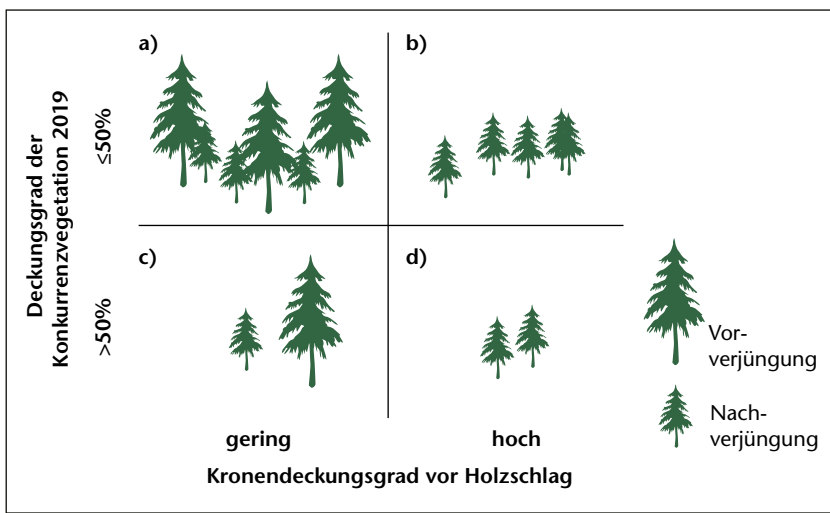


Abb 1 Konzeptuelles Modell für das Mass von Fichtenvor- und -nachverjüngung in Abhängigkeit des Kronendeckungsgrades vor dem Holzschlag und des Deckungsgrades der Konkurrenzvegetation bei der Stichprobeninventur im Jahr 2019. Auf die Situationen a) bis d) wird im Text Bezug genommen.

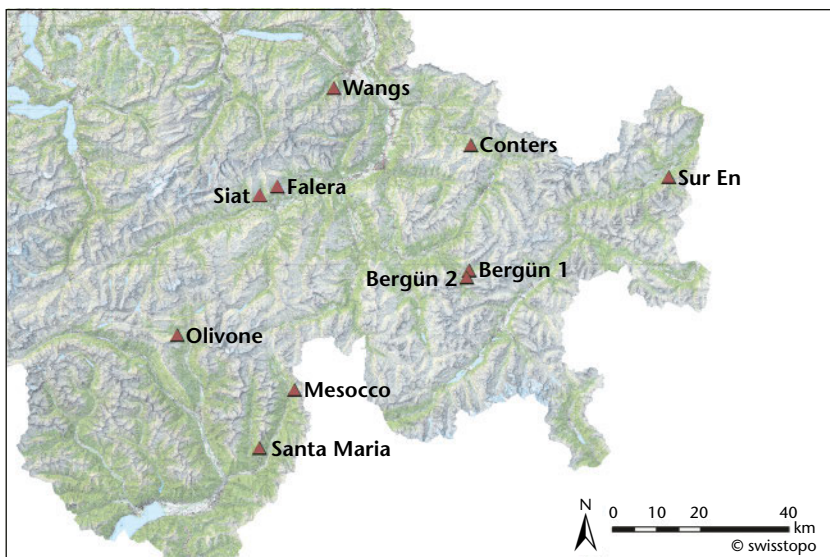


Abb 2 Standorte der untersuchten Lücken.

ten- und Fichten-Tannenwäldern und fokussieren dabei auf deren natürliche Verjüngung. Eine erste Studie umfasste 30 Lücken, in denen 8 bis 24 Jahre nach dem Holzschlag die Verjüngung ausserordentlich variabel angekommen war. Bei Lückenbreiten von 50 bis 70 m trat die Verjüngung nur spärlich auf, besonders an trockenen Standorten (Brang et al 2017). Deutlich war auch der negative Effekt von verdämmender Krautvegetation, zum Beispiel von Hochstauden und Reitgras, auf die Verjüngung. An verjüngungsgünstigen Standorten und bei zahlreicher Vorverjüngung war die Verjüngung aber teils auch in sehr grossen Lücken erfolgreich.

Trotz dieser umfangreichen Studie blieben viele Fragen offen, besonders was den Einfluss der Bestandesgeschichte betrifft. Im Gebirgswaldbau geht man davon aus (z.B. Ott et al 1997), dass der Deckungsgrad der Baumkronen die Entwicklung von verdämmender Krautvegetation stark beeinflusst und damit auch die Baumverjüngung. Negative Ef-

fekte einer dichten Krautvegetation auf die Verjüngung in Schweizer Gebirgswäldern wurden auch nach Windwurf beschrieben (Wohlgemuth et al 2002). Wie rasch nach einem Hieb oder einer Störung diese Effekte aber auftreten, ist noch kaum bekannt (Brang et al 2017, s. aber Vilhar et al 2015).

Zur Verifizierung der Ergebnisse der erwähnten Studie in 30 Lücken führten wir eine Folgestudie durch (Bachelorarbeit von Kalt 2019). Dabei gingen wir von einem konzeptionellen Modell aus, das postuliert, wie dicht die Verjüngung bei unterschiedlichen Ausgangslagen 10 bis 20 Jahre nach dem Schlag in grossen Lücken sein dürfte (Abbildung 1). Als massgebliche Einflussfaktoren erachteten wir 1) den Deckungsgrad von Kraut- und Grasarten, die die Ansamung und damit die Verjüngungsdichte nachgewiesenermassen negativ beeinflussen («Konkurrenzvegetation»: Hochstauden, Reitgras, Himbeeren, Farne), und 2) den Kronendeckungsgrad vor dem Schlagen der Lücken als Mass für die Chance, dass sich bereits unter Schirm Vorverjüngung eingestellt hat, sowie als Mass für die Abwesenheit von Konkurrenzvegetation. Wir erwarteten Vorverjüngung nur dann, wenn der Kronendeckungsgrad vor dem Schlagen der Lücken gering war (Situationen a und c). Im Gegenzug erwarteten wir viel Nachverjüngung, wenn der Kronendeckungsgrad vor dem Holzschlag hoch und damit die Konkurrenzvegetation noch nicht etabliert war (Situationen b und d, sogenanntes «Window of opportunity»). Im Weiteren erwarteten wir bei einer geringen Deckung durch Konkurrenzvegetation (Situationen a und b) mehr Nachverjüngung als bei hoher Deckung (Situationen c und d). Wir nahmen zudem an, dass die 2019 gefundene Konkurrenzvegetation auch auf die Art der Vegetation hinweist, die sich unmittelbar nach dem Holzschlag eingestellt hat.

Material und Methoden

Das methodische Konzept dieser Studie war die Kombination einer Inventur in grossen Bestandeslücken im Jahr 2019, die auf die Verjüngung und die Konkurrenzvegetation fokussierte, mit einer Analyse von historischen Stereoluftbildern, mit denen die Öffnung des Kronendachs in der Vergangenheit erfasst wurde. Im Zentrum unserer Studie stand die Fichtenverjüngung, da die Tannenverjüngung nur in einer von zehn Flächen auftrat.

Auswahl der Lücken

Aus den von Brang et al (2017) untersuchten 30 Lücken in Fichten- und Fichten-Tannen-Wäldern wurden zehn Lücken in der Südostschweiz und im Tessin ausgewählt (Abbildung 2). Die Lücken waren durchschnittlich 20 Jahre alt (Spannweite: 13 bis 29 Jahre) und 0.22 bis 3.31 Hektaren gross.

Gemeinde	Entstehung der Lücke (Jahr)	Breite/Länge (m)	Höhenlage (m ü.M.)	Exposition	Neigung (%)	Standorttyp	Verjüngungserfolg im Jahr 2014
Bergün 1	2006	83/330	1628	Nordwest	26	54/55*	ja
Olivone	1990	77/400	1462	Nord	44	47	ja
Siat	2004	44/200	1626	Südwest	51	57	ja
Sur En	2006	37/640	1467	Nordwest	35	53*/54	nein
Santa Maria i. C.	2006	44/330	1541	Südost	26	47	nein
Mesocco	1999	63/400	1506	West	54	47	nein
Wangs	1994	60/100	1542	Nord	48	50/51	nein
Bergün 2	2006	62/150	1836	Südwest	62	54A	nein
Falera	1993	63/150	1588	Südost	52	55	ja
Conters	1999	25/320	1595	Nordost	48	57V	ja

Tab 1 Merkmale der untersuchten Lücken: Bewirtschaftung und Standort. Der Standorttyp bezieht sich auf Frehner et al (2005).

Die untersuchten Lücken (Tabelle 1) wurden so ausgewählt, dass Lücken mit und ohne «Verjüngungserfolg» (Stand 2014) gleichermaßen vertreten waren. Die Beurteilung des Verjüngungserfolgs basierte auf einem Vergleich des Istwerts von Stammzahlen (= Verjüngungsdichten) mit Sollwerten, die in Brang et al (2017) entwickelt und auf die Lücken angewendet worden waren. Diese als Vorschlag zu betrachtenden Sollwerte stützen sich auf die Überlegung, dass kleinere Pflanzen (Anwuchs, 10 bis 39 cm hoch) eher ausfallen (Streit et al 2009) und daher weniger stark gewichtet werden als grössere Pflanzen (Aufwuchs, 40 bis 139 cm hoch, und Nachwuchs, 130 cm Höhe bis 12 cm BHD). Zudem wurde

auch versucht, nach Norden und nach Süden exponierte Lücken zu berücksichtigen.

Luftbildanalyse

Zur Ermittlung der Bestandesgeschichte, der Waldstruktur vor dem Holzschlag und der Lage der heutigen Lücken wurden Luftbilder verwendet. Pro Lücke wurden aus 7 bis 10 Luftbildern der Periode 1946/1956 bis 2017 (Abstand 5 bis 10 Jahre) frühere Eingriffsjahre mittels Expertenschätzung bestimmt. Als Datengrundlage für die Stereobildanalyse zur Bestimmung der Kronenbedeckung vor dem letzten Holzschlag dienten Schwarz-Weiss-Luftbilder von swisstopo aus dem Jahr 1985 (Abbildung 3a). Das Jahr 1985 wurde gewählt, weil es die Bestandesstruktur vor dem Schlag der ältesten Lücke zeigt. Zur Bestimmung der Lage der heutigen Lücken wurden Luftbilder aus dem Jahr 2017 verwendet (Abbildung 3b). Da die frühere Kronenbedeckung auf den Luftbildern nicht genau genug bestimmt werden kann, wurden die Kronendurchmesser der auf dem Luftbild sichtbaren Bäume aus den Baumhöhen geschätzt. Zuerst wurden im Bereich der Lücke (im Jahr 2017) die Spitzen des abgebildeten Bestandes mittels Stereobildanalyse lagerichtig korrigiert (Ackermann et al 2012). Durch Abzug des Wertes des digitalen Geländemodelles swissALTI3D von der Höhe der digitalisierten Baumspitze wurden in der Folge die Baumhöhen berechnet. Aus allometrischen Beziehungen zwischen Baumhöhe und Kronendurchmesser wurde schliesslich rund um jede Kronenspitze eine lokale Kronenbedeckung simuliert. Die allometrischen Beziehungen wurden aus Daten ertragskundlicher Versuchsflächen (Forrester et al 2019) für lebende, stehende Fichten der entsprechenden Höhenstufen abgeleitet (Kalt 2019, Abbildung 3c).

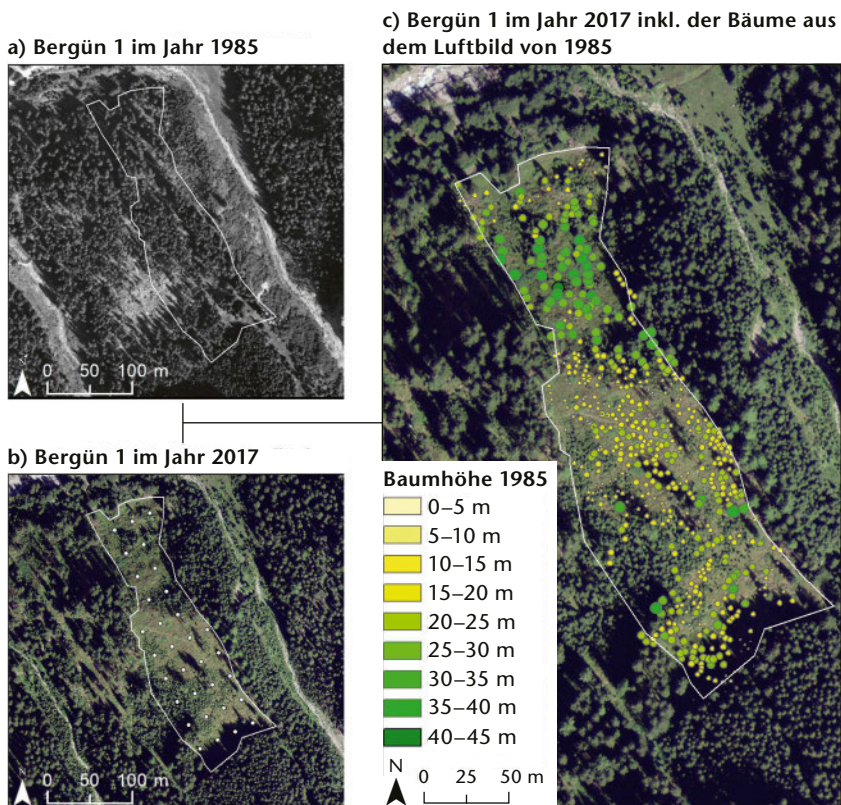


Abb 3 Luftbilder der Fläche Bergün 1 im Jahr 1985 (a) und 2017 (b). Im Bild rechts wurden die Baumkronen aus dem Luftbild von 1985 ins Luftbild von 2017 projiziert (c). Die weissen Punkte in (b) zeigen die Zentren der Probekreise für die Verjüngungsaufnahmen.

Verjüngungsinventur

Die Verjüngungsinventur wurde im Juni und Juli 2019 durchgeführt. Das Zeitfenster wurde so gewählt, dass die Vegetation in den Lücken bereits ent-

wickelt und damit erfassbar war. Die Inventur erstreckte sich auf 30 Probekreise pro Lücke, die in einem Raster gleichmässig platziert wurden (Abbildung 3b) und horizontal 20 m² gross waren (Radius von 2.52 m mit Neigungskorrektur). Sie wurden den zwei Kategorien Randlage und Lückeninneres zugeteilt. Lag ein Probekreis innerhalb von 10 m Abstand zum angrenzenden Wald, wurde dieser die Kategorie Randlage zugewiesen.

In jedem Probekreis wurden die Verjüngungspflanzen für jede Baumart separat für Anwuchs, Aufwuchs und Nachwuchs ausgezählt. Kleinere Verjüngungspflanzen (<10 cm) wurden wegen ihrer hohen Dynamik bezüglich Auftretens und Verschwindens nicht mitgezählt (Streit et al 2009). Bei der Fichte wurde ausserdem grob zwischen Vor- und Nachverjüngung unterschieden; dazu diente die Faustformel, dass das Alter einer Fichte der Anzahl sichtbarer Astquirle plus fünf entspricht. War eine Fichte älter als die untersuchte Lücke, wurde sie der Vorverjüngung zugeordnet. Als Mass für die Verbissintensität wurde der Anteil von verbissenen Bäumchen über alle Baumarten und Grössenklassen pro Probe- fläche erfasst. Ein Baum galt als verbissen, wenn der Endtrieb Spuren von Verbiss aufwies. In Probekreisen ohne Verjüngungspflanzen wurde die mittlere Verbissintensität der Lücke genommen.

Aufnahme der Bodenbedeckung

Pro Probekreis wurde ausserdem die Bodenbedeckung geschätzt. Dabei wurden folgende Kategorien unterschieden: Hochstauden (meistens *Cicerbita*-, *Adenostyles*-, *Petasites*-Arten), Zwergsträucher, andere Sträucher, Reitgras, andere Süssgräser, Sauergräser, Himbeere, Brombeere, Krautvegetation, Farne, Moose, vegetationsfreie Mineralerde, vegetationsfreie Streu, Fels und Stein, Baumstumpf, anderes Moderholz, Asthaufen und anderes. Die Schätzung wurde auf 5% genau vorgenommen, und die Summe der Schätzungen durfte 100% übersteigen, da sich die verschiedenen Vegetationskategorien

oft überlappten. Zudem wurde das Vorhandensein von Vogelbeeren im Probekreis erfasst (ja/nein), um ihren Einfluss auf Fichtenverjüngung zu überprüfen.

Datenanalyse

Die statistische Datenanalyse wurde mit einem generalisierten linearen gemischten Modell GLMM durchgeführt (Paket glmmTMB in R; Brooks et al 2017). Dabei wurde für jede Höhenklasse (An-, Auf-, Nachwuchs) der Fichte die Abhängigkeit der Verjüngungsstammzahl von 1) der Bodenbedeckung der einzelnen Kategorien [%], 2) dem Kronendeckungsgrad vor dem Schlag [%], 3) der Lage des Probekreises innerhalb der Lücke (Lückenrand/Lücke), 4) dem Ansamlungszeitpunkt (Vor-/Nachverjüngung), 5) der Anwesenheit von Vogelbeere (vorhanden/abwesend), 6) der Hangexposition (Süd-/Nordexposition) sowie 7) der Verbissintensität [%] getestet. Der Einfluss von seltenen Bodenbedeckungskategorien (Brombeere, andere Sträucher, anderes) wurde nicht getestet. Die Lücke wurde als Zufallsfaktor getestet, der sich aber in keinem der Modelle als signifikant erwies. Dies weist darauf hin, dass die gefundenen Zusammenhänge nicht von nicht erfassten Unterschieden zwischen den Lücken abhängen. Wir verzichteten darauf, die Verjüngung anderer Baumarten statistisch zu modellieren, weil diese nur einen untergeordneten Anteil aufweisen (z.B. Birke 6%, Vogelbeere 5%, Tanne und Lärche jeweils 4%) und deren ökologische Ansprüche in der Verjüngungsphase von jenen der Fichte abweichen.

Resultate

Waldbauliche Eingriffe

In zwei der zehn Lücken (Sur En, Wangs) hatten gemäss den Luftbildern vor dem letzten Eingriff zumindest seit den 60er-Jahren keine Eingriffe mehr stattgefunden. In Mesocco erfolgte der vorletzte Ein-

Gemeinde	Letzter Eingriff	Befliegungsjahre mit Hinweisen auf kurz zuvor erfolgte Eingriffe	Kronendeckungsgrad 1983/1985 (%)	Deckungsgrad der Konkurrenzvegetation 2019 (%)
Bergün 1	2006	1973, 1985, 1997	25	27
Olivone	1990	1977, 1983	24	61
Siat	2004	1966, 1990	36	35
Sur En	2006	keine	41	46
Santa Maria i. C.	2006	1983, 1989	28	26
Mesocco	1999	1977	21	40
Wangs	1994	keine	56	42
Bergün 2	2006	1985	26	49
Falera	1993	1973, 1990	56	36
Conters	1999	1967, 1997	23	36

Tab 2 Frühere waldbauliche Eingriffe in den zehn untersuchten Lücken, Kronendeckungsgrad des Bestandes 1983/1985 und Deckungsgrad der Konkurrenzvegetation 2019.

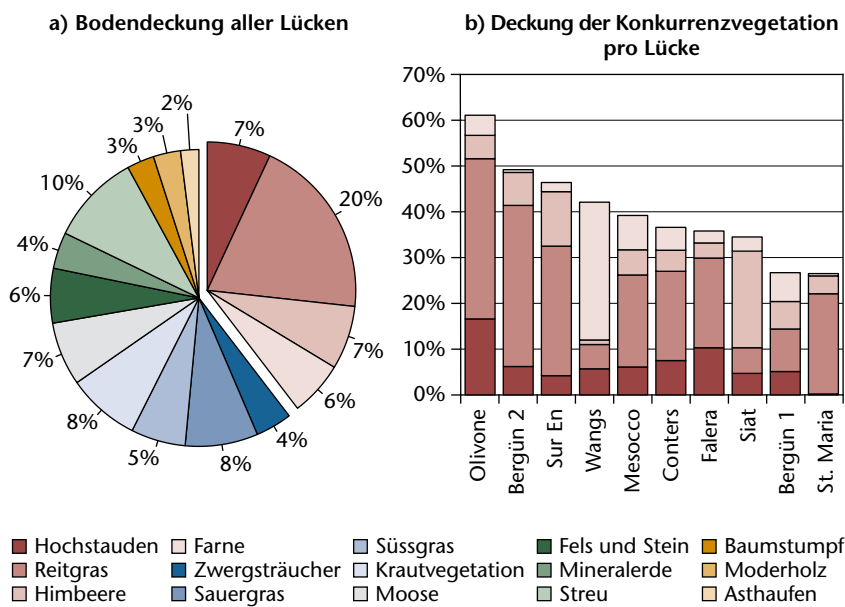


Abb 4 Mittlere Deckungsgrade aller Bodendeckungskategorien über alle Lücken (a) sowie mittlere Deckungsgrade pro Lücke der negativ wirkenden Konkurrenzvegetation Hochstauden, Reitgras, Himbeere und Farne (b).

Nachverjüngung	Baumart	Mittlere Dichte		Verbiss	
		Stück/ha	SEM	Intensität (%)	Lückenmittel (%)
Anwuchs	Alle Baumarten	1775	± 205	16	1–41
	Fichte	1382	± 189	9	0–40
Aufwuchs	Alle Baumarten	1748	± 131	23	2–40
	Fichte	1145	± 112	11	0–29
Nachwuchs	Alle Baumarten	1927	± 194	5	0–20
	Fichte	1345	± 186	1	0–7

Tab 3 Mittlere Dichte der Nachverjüngung sowie Verbissintensität im An-, Auf- und Nachwuchs in den 300 Probekreisen. SEM = Standardabweichung.

griff in den 70er-Jahren, in Bergün 2 in den 1980er-Jahren. Die sechs übrigen Flächen (Bergün 1, Olivone, Siat, Santa Maria i. C., Falera und Conters) sind seit den 1960er-Jahren mehrmals bewirtschaftet worden (Tabelle 2). Die geschätzten mittleren Kronendeckungsgrade pro Lücke lagen 1985 zwischen 21 und 56%. Wie auch die teils grossen Distanzen zwischen den Kronen in Abbildung 3c zeigen, dürften die mit der hier verwendeten Methode geschätzten Kronendeckungsgrade die effektiven Deckungsgrade unterschätzen, weil im Schatten der Kronen einige kleinere Bäume übersehen werden können, insbesondere am Nordhang. Eine andere Unterschätzung ist aufgrund der Baumhöhen-Kronendurchmesser-Allometrie möglich; diese sollte aber systematisch ausgefallen sein und unsere Auswertung nicht wesentlich beeinflusst haben.

Bodenbedeckung in den Lücken

Die Bodenbedeckung war sehr divers (Abbildung 4a). Reitgras war mit 20% Anteil am häufigsten, gefolgt von acht Bodendeckungstypen mit mittleren Anteilen zwischen 10% und 6% (geordnet nach

abnehmendem Anteil: vegetationsfreie Streu, Krautvegetation, Sauergräser, Moose, Himbeere, Hochstauden, Farne). Die aufgrund dieser und weiterer Studien (z.B. Brang et al 2017) als verjüngungsverdämmend bekannten Bodendeckungstypen Hochstauden, Reitgras, Himbeere und Farne (in der Folge als Konkurrenzvegetation bezeichnet) sind in den Lücken insgesamt recht ähnlich verteilt und bedeckten zusammen zwischen 30% und 60% der Lücken (Abbildung 4b). Beim Vergleich der Anteile und der Zusammensetzung der Konkurrenzvegetation fallen die hohen Deckungsgrade von Farn in Wangs und von Himbeere in Siat auf. In Olivone überstieg die Deckung der Konkurrenzvegetation 50%, wogegen sie in Bergün 1 und St. Maria unter 30% blieb.

Verjüngungspflanzen

Von den 300 Probekreisen wiesen 263 (88%) mindestens eine Verjüngungspflanze auf und 236 (79%) eine Fichten-Verjüngungspflanze. Fichtenvorverjüngung wurde auf 19% der Probekreise gefunden, Fichtennachverjüngung hingegen auf 77%. Auf 37 Probekreisen (12%) fand sich keine Verjüngungspflanze. Beim Anwuchs lag die mittlere Dichte über alle Arten bei 1775 St./ha (Fichte: 1382), beim Aufwuchs belief sie sich auf 1748 St./ha (Fichte: 1145), beim Nachwuchs auf 1927 St./ha (Fichte: 1345; Tabelle 3). Die mittlere Dichte der Fichtenvorverjüngung lag im Anwuchs bei 3 ± 3 St./ha, beim Aufwuchs bei 23 ± 13 St./ha und beim Nachwuchs bei 388 ± 86 St./ha. Damit lag der Anteil der Fichtenvorverjüngung bei 0.2% für den Anwuchs, bei 2% für den Aufwuchs und bei rund 30% für den Nachwuchs. Die Verbissintensität aller Pflanzen lag 2019 bei 16% für den Anwuchs, bei 23% für den Aufwuchs und bei 5% für den Nachwuchs (Tabelle 3). Bei der Fichte waren die Werte 9% für den Anwuchs, 11% für den Aufwuchs und 1% für den Nachwuchs.

Einflussfaktoren für die Verjüngungsdichte

Fichtenanwuchs: Die statistische Modellierung ergab, dass die Dichte des Anwuchses signifikant positiv vom Deckungsgrad von Moosen (stärkster Effekt), Zwergsträuchern, Baumstümpfen und Moderholz auf den Probekreisen beeinflusst war (Tabelle 4). Tendenziell war die Dichte auch erhöht in Krautvegetation, im Randbereich der Lücken sowie bei grosser Lückenbreite. An Südhängen zeigt sich ausserdem eine hohe Kronendeckung vor dem Schlag als verjüngungsfördernd. Negativ auf die Stammzahl des Fichtenanwuchses wirkte sich die Deckung durch Hochstauden (stärkster Effekt), Himbeeren, vegetationsfreier Streu und Asthaufen aus.

Fichtenaufwuchs: Bei der Bodenbedeckung wirkte sich nur die Präsenz von Vogelbeere und Moderholz tendenziell positiv auf den Fichtenaufwuchs aus (Tabelle 4). Ein hoher Kronenschluss vor dem Holzschlag zeigte ebenfalls einen signifikant positiven

Effekt. Hingegen war bei hoher Deckung durch Süssgräser, Farne (stärkster Effekt) und Asthaufen die Aufwuchsdichte geringer. Ebenfalls war sie bei Abwesenheit von Fichtenvorverjüngung (nur tendenziell) so wie bei hoher Verbissintensität geringer.

Fichtennachwuchs: Die Nachwuchsdichte korrelierte positiv mit der Anwesenheit von Vogelbeeren, Moosen und einem hohen Kronendeckungsgrad vor dem Schlag (stärkster Effekt; Tabelle 4). Viele Faktoren korrelierten dagegen negativ mit der Nachwuchsdichte: Deckungsgrad von Reitgras (sehr nahe beim stärksten Effekt), Farnen (stärkster Effekt unter den Bodenbedeckungstypen), Hochstauden und Zwergsträuchern, tendenziell auch von Sauergräsern, Himbeere, Krautvegetation sowie von Felsen und Steinen. Die Nachwuchsdichte war auch vermindert bei hoher Verbissintensität (insgesamt

stärkster signifikanter Effekt), einer Position im Randbereich und in Südexposition. Der Expositionseffekt war nur schwach signifikant, vermutlich weil die Anzahl untersuchter Lücken (N=10) zu gering war.

Dichte der Vor- und Nachverjüngung

Die Vorverjüngung war durchwegs spärlich vertreten. Auf mindestens der Hälfte der 20 m² grossen Probestellen fehlte sie ganz, unabhängig von der Deckung der Konkurrenzvegetation und der Kronendeckung vor dem Holzschlag (Medianwerte von 0 St./ha; Abbildung 5). Bei Konkurrenzvegetation (Hochstauden, Reitgras, Himbeere, Farne) mit bis zu 50% Deckung fand sich Vorverjüngung in Fällen, in denen der Deckungsgrad des Bestandes vor dem Schlag gering und mittel war; hier lag das obere Quartil der Dichte der Vorverjüngung bei immerhin rund 500/ha. Bei stark deckender Konkurrenzvegetation (>50%) war auf 88% der Probestellen keine Vorverjüngung vorhanden.

Die höchsten Dichten der Nachverjüngung traten in Probestellen mit Deckungsgraden der Konkurrenzvegetation unter 50% und mittlerer bis hoher Kronendeckung vor dem Holzschlag auf (Median: 3500–5500 St./ha). Auch die Nachverjüngung war bei höherem Deckungsgrad der Konkurrenzvegetation vermindert vorhanden, besonders deutlich auf Probestellen, die vor dem Schlagen der Lücken einen offenen Bestand aufwiesen (Median: 500 St./ha). Hier war eine hohe bis mittlere Kronendeckung vor dem Holzschlag mit den besten Bedingungen für die Nachverjüngung (Median: 1500–3000 St./ha) verbunden.

Diskussion

Geplante Verjüngungshiebe, die deutlich grösser und breiter sind als waldbaulich empfohlen (Ott et al 1997) und zuweilen auch 0.25 Hektaren überschreiten, sind in Gebirgsnadelwäldern der Schweiz die Ausnahme. Derart grosse Lücken könnten aber häufiger werden, weil der Klimawandel die störungsbedingte Lückenbildung fördert (Bebi et al 2016). Die vorliegende Studie zeigt wie schon unsere frühere Studie (Brang et al 2017), dass sich solche Lücken in günstigen Fällen ausreichend natürlich verjüngen, in anderen Fällen aber nur spärlich bestocken. Sie zeigt, dass der Verjüngungserfolg im Wesentlichen von der Art der Konkurrenzvegetation und vom Kronendeckungsgrad vor dem Holzschlag abhängt.

Bestätigen die Ergebnisse damit die im konzeptuellen Modell (Abbildung 1) angenommenen Zusammenhänge? Generell zeigte sich wie erwartet eine starke Abhängigkeit der Verjüngungsdichten von der Konkurrenzvegetation: Viel Konkurrenzvegetation verminderte die Dichte der Verjüngung al-

Parameter	Anwuchs	Aufwuchs	Nachwuchs
Standort			
Südexposition	0.08	-0.05	-1.23(*)
Neigung	0.13	-0.02	0.16
Präsenz Vogelbeere	-0.13	0.45*	0.71**
Verbiss	-0.14	-0.35**	-0.91***
Bodenbedeckung			
Reitgras	0.02	-0.16	-0.78***
Sauergräser	-0.1	-0.18	-0.26(*)
Süßgräser	0.05	-0.22*	-0.15
Hochstauden	-0.47**	-0.04	-0.44**
Himbeere	-0.28*	-0.11	-0.28(*)
Farne	-0.13	-0.37*	-0.80***
Krautvegetation	0.27(*)	0.04	-0.27(*)
Moose	0.38**	0.14	0.28*
Zwergsträucher	0.32*	0.04	-0.38**
Vegetationsfreie Streu	-0.35*	-0.18	-0.06
Vegetationsfrei Mineralerde	-0.16	-0.17	0.07
Fels und Stein	0.08	0.05	-0.20(*)
Baumstumpf	0.33**	0.06	-0.06
Moderholz	0.26*	0.14(*)	-0.06
Asthaufen	-0.32*	-0.36**	0.12
Management			
Jahre seit Eingriff	-0.15	-0.06	0.35
Deckungsgrad vor Eingriff (1985)	-0.18	0.33**	0.33*
Präsenz Vorverjüngung	-0.1	0.37(*)	0.16
Lückebreite	0.22(*)	-0.17	-0.23
Randbereich der Lücke	0.52(*)	0.02	-0.80**
Interaktionen			
Deckungsgrad vor Eingriff (1985) an Südexposition (im Vergleich zu Nordexposition)	0.55(*)	0.26	0.61

Tab 4 Ergebnisse der statistischen Modellierung der Dichte der Fichtenverjüngung (Vor- und Nachverjüngung) nach Höhenklassen (An-, Auf- und Nachwuchs). Dargestellt sind die Koeffizienten der einzelnen Parameter. Sterne bezeichnen das Signifikanzniveau: (*) $p=0.10-0.05$, * $p=0.05-0.01$, ** $p=0.01-0.001$, *** $p<0.001$. Signifikante Parameter sind farblich hervorgehoben (unterschieden in positive und negative Effekte).

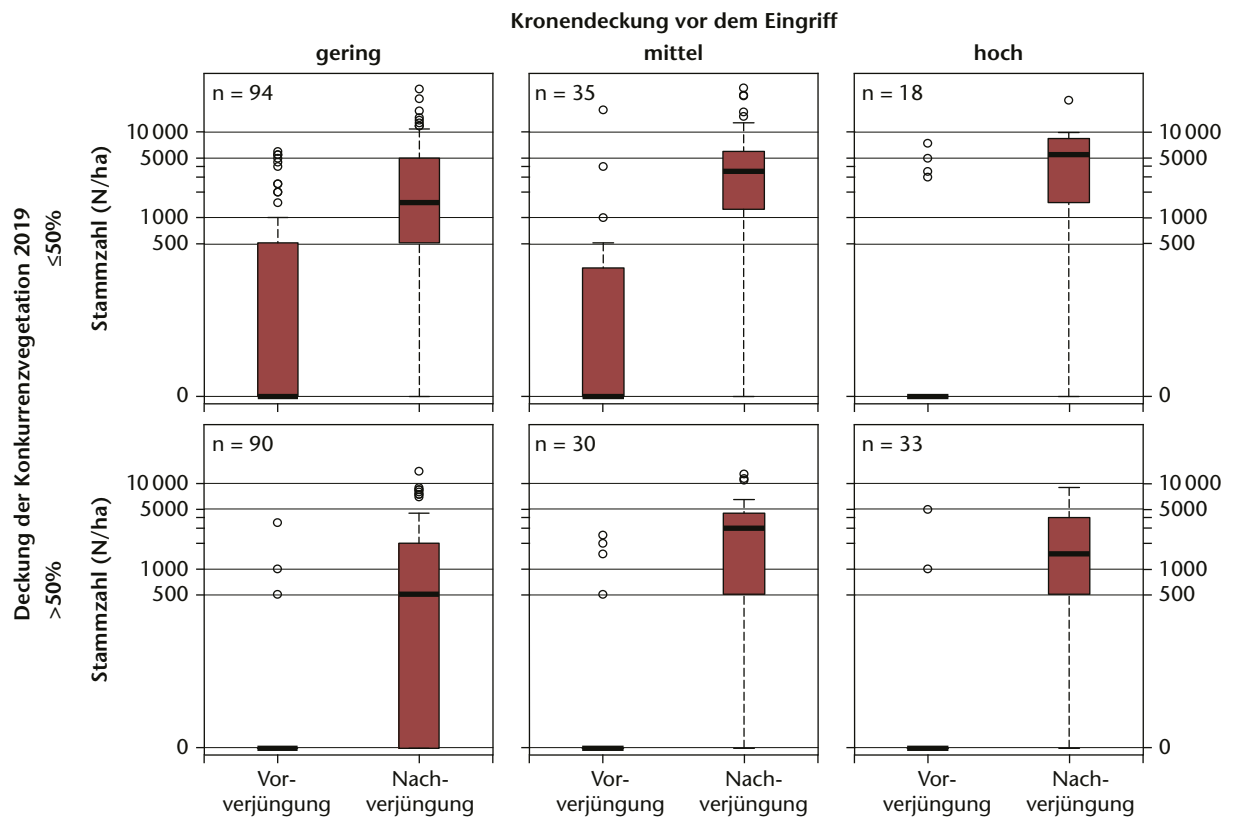


Abb 5 Dichte der Vor- und der Nachverjüngung der Fichte aufgeteilt nach der errechneten Kronendeckung vor dem Eingriff und dem Deckungsgrad von Konkurrenzvegetation (Hochstauden, Reitgras, Himbeere, Farne) im Jahr 2019. Die Kronendeckung ist unterteilt in gering ($\leq 40\%$), mittel (40–70%) und hoch ($>70\%$). n = Anzahl Probeflächen nach Kategorie.

ler Grössenklassen (Tabelle 3), oft auf die Hälfte oder noch weniger (Abbildung 5). Dass die Effekte der Bodenbedeckung je nach Grössenklasse bei unterschiedlichen Bodendeckungstypen signifikant waren, dürfte teils auf die mit 300 Probekreisen geringe Stichprobe, die sich bei Aufteilung der Verjüngung auf Grössenklassen noch wesentlich verringert, zurückzuführen sein. Zudem wurden bei den Inventuren nur die Bodendeckungstypen pro Probekreis erfasst und nicht die Deckung am unmittelbaren Wuchsort der Verjüngungspflanzen. Dies könnte auch erklären, weshalb kein negativer Effekt von Reitgras auf den Anwuchs und den Aufwuchs gefunden wurde, im Gegensatz zu anderen Studien (z.B. Brang et al 2017). Auf Baumstümpfen traten mehr Anwuchspflanzen, auf liegendem Moderholz zusätzlich tendenziell mehr Aufwuchspflanzen auf als auf sonstigen Substraten (Tabelle 3). Dabei handelte es sich vorwiegend um Holz, das aus der Zeit vor dem Schlagen der Lücken stammte, denn das dabei entstandene Moderholz dürfte 13–29 Jahre nach dem Holzschlag erst gerade für die Ansamung geeignet geworden sein (Bače et al 2012). Ähnlich wie in früheren Studien (Sorg 1980, Kramer et al 2014, Brang et al 2017) wirkten Moose verjüngungsfördernd, Reitgras, Farne, Hochstauden und Himbeeren jedoch verjüngungsmindernd. Solche Konkurrenzvegetation bildet nach einem Holzschlag oft relativ dauerhafte Stadien, und es gibt – ausser beim Störungszeiger Himbeere – wenig Evidenz dafür, dass sich das

Artenspektrum an einem Ort im Laufe der Zeit stark ändert. Nach dem Schlagen der Lücken dürfte vielmehr, wie auf Sturmflächen (Brang et al 2015, Heurich 2001, Wohlgemuth et al 2002), die Deckung bereits vorhandener Arten stark zugenommen haben. Die Präsenz von Vorverjüngung der halbschattentoleranten Fichte (Tjoelker et al 2007) belegt, dass sie sich, besonders nach Auflichtungen oder natürlichen kleinflächigen Störungen (50–200 m²; Brang 1998, McCarthy 2001), im Bestand einstellen kann. Allerdings war dieser Effekt in Probekreisen mit viel verjüngungshemmender Vegetation nur gering (vgl. Kramer et al 2014); Vorverjüngung kam hier, im Gegensatz zu Probekreisen mit wenig solcher Vegetation, nur vereinzelt vor (Abbildung 5).

Mit unserem konzeptuellen Modell (Abbildung 1) postulierten wir zudem, dass eine hohe Kronendeckung das Aufkommen von Konkurrenzvegetation nach einem Holzschlag verlangsamt, weshalb dann vorübergehend Bedingungen herrschen, die die Nachverjüngung begünstigen. Unsere Studie erlaubt es nicht, diese langsamere Entwicklung der Konkurrenzvegetation bei vorherigem hohem Kronenschluss zu belegen, weil seit dem Holzschlag zu viel Zeit verstrichen ist. Doch sprechen die mehrfach (ca. dreimal) höheren Dichten der Nachverjüngung bei hoher vorheriger Kronendeckung (Abbildung 5) für unsere Vermutung, sowohl bei geringer als auch bei hoher Deckung der Konkurrenzvegetation. Dies ist ein klarer Hinweis für eine kurze Phase

hoher Verjüngungsgunst nach einem Holzschlag (Window of opportunity). In Gebirgswäldern mit relativ geringer Kronendeckung sind diese günstigen Bedingungen oft nicht primär mit höherem Lichteinfall verbunden, sondern mit der temporären Reduktion der unterirdischen Konkurrenz nach dem Absterben von Wurzeln der geschlagenen Bäume (Casper und Jackson 1997). Nach dem Holzschlag werden am Waldrand und in den Lücken auch mehr Nährstoffe im Oberboden verfügbar, da sich Rohhumusdecken abbauen (Brang 1998, McCarthy 2001). Der Zusammenhang zwischen hoher Kronendeckung vor dem Holzschlag und dichter Nachverjüngung war bei hoher Deckung der Konkurrenzvegetation zwar auch vorhanden, aber die Nachverjüngung war insgesamt viel spärlicher (Abbildung 5). Dieser Effekt ist bekanntermassen standortspezifisch, weil stark deckende Pflanzenarten an gewissen Standorten, z.B. an solchen mit Hochstaudenfluren (Ott et al 1997), häufiger auftreten als an anderen.

Die Dichte der Verjüngungspflanzen in verschiedenen Grössenklassen dürfte voneinander abhängen. In Tannen-Fichten-Beständen im Schwarzwald kulminierte die Dichte der verjüngten Bäumchen bei einer Höhe von rund 0.5 Meter (Dănescu et al 2018) und nahm bei grösseren Bäumchen wegen zunehmender Konkurrenz wieder ab. Die Anwesenheit von Vorverjüngung bedeutete in unserer Studie auch wenig Anwuchs, aber mehr Aufwuchs, wenn diese Effekte auch nicht signifikant waren. Wir vermuten, können aber nicht belegen, dass die Anwesenheit von Vorverjüngung nach dem Schlag in der unmittelbaren Umgebung der verjüngten Bäumchen für die Nachverjüngung günstige Kleinstandorte schafft, zum Beispiel wegen früherer Ausaperung im Frühjahr.

Zu den komplexen Wirkungen von Konkurrenzvegetation und Auflichtungen auf die Fichtenverjüngung kommt der Wildhuftiereinfluss hinzu, der die Aufwuchs- und Nachwuchsdichte signifikant reduzierte (vgl. Kupferschmid & Bugmann 2005a, 2005b). Die nur 2019 erfasste Verbissintensität dürfte somit auch den Verbisseinfluss auf die Verjüngung während der letzten 30 Jahre zumindest grob abbilden. Dafür spricht auch der positive Effekt der Vogelbeerenpräsenz, die von Wildverbiss stark betroffen ist (Motta 2003), auf die Dichte des Fichtenauf- und -nachwuchses. Die Vogelbeere ist oft die einzige Laubbaumart, die sich in Fichtenwäldern verjüngt, und deshalb eine wichtige Begleitbaumart der Fichte nach starken Eingriffen oder Störungen (Leder 1997, Heurich et al 2012).

Eine retrospektive Studie wie die hier präsentierte kann die Entwicklung der Verjüngung in den untersuchten Lücken nicht nachzeichnen, sondern zeigt nur das Endresultat. Die Analyse der Luftbilder erlaubte immerhin, jedem Probekreis einen Deckungswert im Jahr 1985 zuzuordnen. Einige der

Einflussfaktoren erfassten wir mit unserer Methode nur relativ ungenau. In Beständen mit geringem Deckungsgrad werden zum Beispiel Seitenlichteffekte nicht berücksichtigt, da der Kronendeckungsgrad nur die vertikale Projektion der Baumkronen darstellt. Auch die Trennung zwischen Vor- und Nachverjüngung ist fehleranfällig, besonders weil bei vielen Verjüngungspflanzen der Entscheid knapp war. Wir wissen auch nicht, wie viel Vorverjüngung beim Schlagen der Lücken beschädigt wurde. Vorsicht bei der Interpretation der Daten ist auch wegen der geringen Anzahl Lücken angebracht, auch wenn sich die statistische Analyse auf die Probekreise innerhalb der Lücken und damit auf eine grössere Stichprobe gestützt hat.

Folgerungen für den Waldbau

Da viele der Erkenntnisse im Licht bisheriger Studien plausibel sind (Brang 1998, Duc & Brang 2013, Hirsiger et al 2013, Imbeck & Ott 1987, Sorg 1980, Streit et al 2009), wagen wir es, Folgerungen für die waldbauliche Behandlung von Fichten- und Fichten-Tannenwäldern zu ziehen. Wir tun dies auch, weil wir nicht einfach grosse Schlagflächen untersucht haben und über feinere waldbauliche Eingriffe nichts aussagen können. Denn der Einbezug der Bestandesgeschichte vor dem Schlagen der Lücke hat es ermöglicht, die frühere waldbauliche Praxis (inkl. des Schlages kleinerer Lücken) für jede der 300 untersuchten Probeflächen grob abzuschätzen und deren Einfluss zu prüfen.

Wichtig ist, bei der Bewirtschaftung einen Unterschied zu machen zwischen verjüngungsfreudigen und -trägen Standorten beziehungsweise Kleinstandorten. An verjüngungsfreudigen Standorten – bei wenig ausgeprägter Konkurrenzvegetation – begünstigen Eingriffe die Vorverjüngung, aber auch die Nachverjüngung wird oft gelingen, egal wie geschlossen ein Bestand vor dem Schlag gewesen ist. Daher ist der waldbauliche Spielraum bezüglich Lückengrösse relativ gross. An verjüngungsträgen Standorten hingegen, d.h. an solchen, an denen sich die Konkurrenzvegetation stark entwickeln kann, begünstigt ein verminderter Kronendeckungsgrad vor dem Schlag das Auftreten von Vorverjüngung wenig, vermindert aber das von Nachverjüngung (Abbildung 5).

In der Praxis heisst das zwar nicht, dass an Standorten mit ausgeprägter Konkurrenzvegetation die Verjüngung nicht im Rahmen der Gebirgspflenterung mit Lücken und Schlitten eingeleitet werden soll, aber diese Vorverjüngung dürfte danach vor allem auf alten Baumstümpfen, altem liegendem Moderholz, umgekippten Wurzeltellern und an anderen Kleinstandorten mit exponierter Mineralerde aufkommen (Motta et al 2006), während sich die verjüngungshemmende Vegetation rasch ausbreitet. Daher sind Moderholz und Baumstümpfe hier be-

sonders wichtig. In Asthaufen stellt sich hingegen keine Verjüngung ein; Äste sollten deshalb an ohnehin ungünstigen Kleinstandorten deponiert werden (vgl. Bottero et al 2013).

Dass wir in unserer Studie keinen Effekt der Offenheit des Bestandes auf die Vorverjüngung gefunden haben, mag mit dem Fehlen von genügend Moderholz und stark gedrängten Fichtenwaldstrukturen vor dem Eingriff zusammenhängen. Dass Vorverjüngung an Standorten mit viel Konkurrenzvegetation nicht leicht zu erzielen ist, zeigt auch die Untersuchung von Verjüngungsschlitzten in der Surselfa in Graubünden (Hirsiger et al 2013), in denen die Verjüngungsdichten 15 bis 20 Jahre nach den Eingriffen immer noch relativ gering und kaum höher waren als in den 30 von Brang et al (2017) untersuchten grossen Verjüngungslücken. Untersuchungen, die auch sehr dichte subalpine Waldstrukturen einschliessen, weisen im Vergleich zu unserer Studie auf einen stärkeren Zusammenhang zwischen Bestandesdichte und Vorhandensein von Vorverjüngung hin (Bebi et al 2001, Guetg 2020).

Da es an Standorten mit starker Konkurrenzvegetation beim jetzigen Kenntnisstand ungewiss ist, wie Vorverjüngung der Fichte mit hinreichender Gewissheit erzielt werden kann, schlagen wir für solche Standorte vor, zuerst einen «Moderholzschlag» durchzuführen, d.h. Moderholz bereitzustellen, und erst etwa 20 Jahre später die Verjüngung einzuleiten. An Standorten mit Verjüngungsschwierigkeiten (aber auch an anderen) dürfte die Verjüngung auch bei Präsenz der Tanne wesentlich leichter gelingen, denn die Tanne ist schattentoleranter als die Fichte (Grassi & Bagnaresi 2001), weniger auf Moderholz angewiesen und vermag sich auch bei starker Vegetationskonkurrenz zu behaupten. ■

Eingereicht: 11. März 2020, akzeptiert (mit Review): 30. Juni 2020

Literatur

- ACKERMANN J, ADLER P, BAUERHANSL C, BROCKAMP U, ENGELS F ET AL (2012) Das digitale Luftbild. Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich. Göttingen: Beiträge Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Band 7. 86 p.
- BAČE R, SVOBODA M, POUŠKA V, JANDA P, ČERVENKA J (2012) Natural regeneration in Central-European subalpine spruce forests: Which logs are suitable for seedling recruitment? For Ecol Manage 266: 254–262.
- BAFU, BFE, SECO, EDITORS (2017) Ressourcenpolitik Holz. Strategie, Ziele und Aktionsplan Holz. Bern: Bundesamt Umwelt. 44 p.
- BEBI P, KIENAST F, SCHÖNENBERGER W (2001) Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests' dynamics and protective function. For Ecol Manage 145: 3–14.
- BEBI P, BUGMANN H, LÜSCHER P, LANGE B, BRANG P (2016) Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bern: Haupt. pp. 269–286.
- BOTTERO A, GARBARINO M, LONG JN, MOTTA R (2013) The interacting ecological effects of large-scale disturbances and salvage logging on montane spruce forest regeneration in the western European Alps. For Ecol Manage 292: 19–28.
- BRANG P (1998) Early seedling establishment of *Picea abies* in small forest gaps in the Swiss Alps. Can J For Res 28: 626–639.
- BRANG P, HILFIKER S, WASEM U, SCHWYZER A, WOHLGEMUTH T (2015) Langzeitforschung auf Sturmflächen zeigt Potenzial und Grenzen der Naturverjüngung. Schweiz Z Forstwes 166: 147–158. doi: 10.3188/szf.2015.0147
- BRANG P, NIKOLOVA P, GORDON R, ZÜRCHER S (2017) Auswirkungen grosser Verjüngungslücken im Gebirgswald auf Verjüngung und Holzzuwachs. Schlussbericht des Projektes Eingriffstärke und Holzzuwachs im Gebirgswald. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 48 p.
- BROOKS ME, KRISTENSEN K, VAN BENTHEM KJ, MAGNUSSON A, BERG CW ET AL (2017) glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. The R Journal 9: 378–400.
- CASPER BB, JACKSON RB (1997) Plant competition underground. Annu Rev Ecol Syst 28: 545–570.
- DĂNESCU A, KOHNLE U, BAUHUS J, WEISKITTEL A, ALBRECHT AT (2018) Long-term development of natural regeneration in irregular, mixed stands of silver fir and Norway spruce. For Ecol Manage 430: 105–116.
- DUC P, BRANG P (2013) Die Verjüngungssituation im Gebirgswald des Schweizerischen Alpenraumes. In: Müller F, editor. Maria-brunner Waldbautage 2002. Ist die natürliche Verjüngung des Waldes gesichert? Wien: Bundesforschungsanstalt Wald, BFW-Berichte 130. pp. 31–49.
- FORRESTER D, NITZSCHE J, SCHMID H (2019) The experimental forest management project: An overview and methodology of the long-term growth and yield plot network. Birmensdorf: Swiss Federal Research Institute WSL. 81 p.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen im Schutzwald. Bern: Bundesamt Umwelt.
- GRASSI G, BAGNARESI U (2001) Foliar morphological and physiological plasticity in *Picea abies* and *Abies alba* saplings along a natural light gradient. Tree Physiol 21: 959–967.
- GUETG M (2020) Dynamik in einschichtigen, dichten Beständen. Zürich: ETH Zürich, Masterarbeit. 66 p.
- HEURICH M, BAIERL F, ZEPPENFELD T (2012) Waldentwicklung im Nationalpark Bayerischer Wald in den Jahren 2006 bis 2011. Ergebnisse der Luftbildauswertung und Hochlageninventur. Grafenau: Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, Ber 8. 36 p.
- HEURICH M, EDITOR (2001) Die Waldentwicklung nach Windwurf in den Hochlagen des Nationalparks Bayerischer Wald. Grafenau: Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, wissenschaftliche Reihe 14. pp. 49–98.
- HIRSIGER E, GMÜR P, WASEM P, WUNDER J, BRANG P (2013) 10 Jahre Erfolgskontrolle in schlitzförmigen Lücken. Wald Holz 13 (3): 29–32.
- IMBECK H, OTT E (1987) Verjüngungsökologische Untersuchungen in einem hochstaudenreichen subalpinen Fichtenwald, mit spezieller Berücksichtigung der Schneeablagerung und der Lawinenbildung. Davos: Eidgenöss Institut Schnee- und Lawinenforschung, Mitteilungen 42. 202 p.
- KALT T (2019) Der Einfluss von Standortseigenschaften und Bestandesgeschichte auf die Naturverjüngung in Gebirgswäldern. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL, Bachelorarbeit. 51 p.
- KRAMERK, BRANG P, BACHOFEN H, BUGMANN H, WOHLGEMUTH T (2014) Site factors are more important than salvage logging for tree regeneration after wind disturbance in Central European forests. Forest Ecol Manage 331: 116–128.

- KUPFERSCHMID AD, BUGMANN H (2005A)** Effects of microsites, logs and ungulate browsing on *Picea abies* regeneration in a mountain forest. For Ecol Manage 205: 251–265.
- KUPFERSCHMID AD, BUGMANN H (2005B)** Erratum to «Effect of microsites, logs and ungulate browsing on *Picea abies* regeneration in a mountain forest» (For Ecol Manage 205 [2005] 251–265). For Ecol Manage 210: 477.
- LEDER B (1997)** Die Vogelbeere – eine unterschätzte Baumart unserer Mittelgebirge. Weihenstephan: Bayer Landesanstalt Wald Forstwirtschaft, LWF Wissen 17. 21–44 p.
- MCCARTHY J (2001)** Gap dynamics of forest trees: A review with particular attention to boreal forests. Environ Rev 9: 1–59.
- MOTTA R (2003)** Ungulate impact on rowan (*Sorbus aucuparia* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) height structure in mountain forests in the eastern Italian Alps. For Ecol Manage 181: 139–150.
- MOTTA R, BERRETTI R, LINGUA E, PIUSSI P (2006)** Coarse woody debris, forest structure and regeneration in the Valbona Forest Reserve, Paneveggio, Italian Alps. For Ecol Manage 235: 155–163.
- OTT E, FREHNER M, FREY HU, LÜSCHER P (1997)** Gebirgsnadelwälder: ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Bern: Haupt. 287 p.
- SCHÖNENBERGER W, BRANG P (2004)** Silviculture in mountain forests. In: Burley J, Evans J, editors. Encyclopedia of Forest Sciences. Amsterdam: Elsevier. pp. 1085–1094.
- SORG J-P (1980)** Végétation et rajeunissement naturel dans la pessière subalpine de Vals (GR). Birmensdorf: Eidgenöss. Forschungsanstalt WSL, Mitteilungen 56: 1–115.
- STREIT K, WUNDER J, BRANG P (2009)** Slit-shaped gaps are a successful silvicultural technique to promote *Picea abies* regeneration in mountain forests of the Swiss Alps. For Ecol Manage 257: 1902–1909.
- TJOELKER MG, BORATYNSKI A, BUGALA W, EDITORS (2007)** Biology and ecology of Norway spruce. Dordrecht: Springer, Forestry Science 78.
- VILHAR U, ROŽENBERGER D, SIMONČIČ P, DIACI J (2015)** Variation in irradiance, soil features and regeneration patterns in experimental forest canopy gaps. Ann For Sci 72: 253–266.
- WOHLGEMUTH T, KULL P, WÜTHRICH H (2002)** Disturbance of microsites and early tree regeneration after windthrow in Swiss mountain forests due to the winter storm Vivian 1990. For Snow Landsc Res 77: 2.

Courte fenêtre temporelle pour la régénération de l'épicéa dans les forêts de conifères de montagne

Au cours des 30 dernières années, les forêts de conifères des montagnes suisses ont été rajeunies par endroits par des coupes à blanc plutôt que par de petites trouées, comme c'est habituellement le cas dans le jardinage de montagne. L'évolution de telles trouées après 13 à 29 ans a été étudiée dans dix coupes à blanc du sud-est de la Suisse et du Tessin à l'aide d'analyses de photos aériennes et d'inventaires par échantillonnage. Des photographies aériennes historiques ont été utilisées pour documenter l'histoire des peuplements et l'ouverture de la canopée avant la coupe. Des inventaires par échantillonnage ont été utilisés pour étudier la régénération actuelle des arbres et les microstations, y compris la couverture végétale. La densité de la régénération entre 10 cm de hauteur et 12 cm de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) était en moyenne de 5450 tiges/ha, dont 71% d'épicéas. Cette valeur moyenne élevée est due aux placettes d'échantillonnage présentant une régénération très dense. La plupart de la régénération de l'épicéa s'est produite après l'abattage; 30% du rajeunissement établi (130 cm de hauteur à 12 cm de DHP) était préexistante. La régénération préexistante était plus dense dans les placettes d'échantillonnage où le peuplement précédent avait déjà été éclairci. Les densités de régénération postérieure les plus élevées ont été observées dans les zones où le couvert de la canopée était moyen ou élevé avant l'abattage. La végétation concurrentielle a réduit la densité de la régénération préexistante et postérieure. La présence de bois pourri et de souches était associée à une densité de régénération plus élevée, tandis que l'abroustissement par les ongulés sauvages était associé à une densité plus faible. Lorsqu'il y a peu de végétation concurrentielle, une phase favorable à la régénération se produit immédiatement après la coupe d'une grande trouée, pendant laquelle la régénération réussit souvent. En revanche, sur les sites qui tendent à former une végétation concurrentielle dense, la régénération s'installe lentement et repose sur le bois en décomposition et les souches.

Short time window for natural regeneration of spruce in coniferous mountain forests

Over the past 30 years, in a few places, Swiss coniferous mountain forests have been regenerated with clear-felling and not with small openings, as it is common with group selection management in mountain forests. The development of such openings after 13 to 29 years was examined in ten clear-cuts in south-eastern Switzerland and Ticino with aerial photo analysis and sampling inventories. Historical aerial photographs were used to assess stand history and crown cover before the harvest. The density of regeneration and the local site conditions including the cover of ground vegetation were recorded using sampling inventories. The density of the regeneration (trees between 10 cm tall and 12 cm diameter at breast height [dbh]) averaged 5450 stems/ha, of which 71% were Norway spruce. This high mean value came about through plots with very dense regeneration. Most of the spruce regeneration originated from post-harvest establishment, but 30% of the regeneration in the size class 130 cm to 12 cm dbh had established before harvesting. The pre-harvest regeneration was denser in plots in which the pre-existing stand had been thinned already. The highest densities of regeneration occurred in stands with medium to high crown cover before the harvest. Competing vegetation reduced the density of pre- and post-harvest regeneration. The presence of rotting wood and tree stumps was associated with a higher regeneration density, while browsing by ungulates was associated with a lower one. If there is little competing vegetation, the creation of a large opening is followed by a phase of favourable regeneration conditions during which regeneration is often successful. In contrast, on sites that tend to develop dense competing vegetation, regeneration establishes only slowly, and is dependent on rotting wood and tree stumps.