

Auswirkungen grosser Verjüngungslücken im Gebirgswald auf Verjüngung und Holzzuwachs. Schlussbericht des Projektes Eingriffsstärke und Holzzuwachs im Gebirgswald

Report

Author(s):

Brang, Peter; Nikolova, Petia; Gordon, Riet; Zürcher, Samuel

Publication date:

2017-08-29

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000184480>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Auswirkungen grosser Verjüngungslücken im Gebirgswald auf Verjüngung und Holzzuwachs

Schlussbericht des Projektes «Eingriffsstärke und Holzzuwachs im Gebirgswald»



29. August 2017, Birmensdorf

Dr. Peter Brang, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf

Dr. Petia Nikolova, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf

Dr. Riet Gordon, Amt für Wald und Naturgefahren, Chur

Samuel Zürcher, Fachstelle für Gebirgswaldpflege, Maienfeld

Impressum

Empfohlene Zitierweise

Brang, P.; Nikolova, P.; Gordon, R.; Zürcher, S. 2017. Auswirkungen grosser Verjüngungslücken im Gebirgswald auf Verjüngung und Holzzuwachs. Schlussbericht des Projektes Eingriffsstärke und Holzzuwachs im Gebirgswald. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 48 S. + Anhang

Der Bericht ist in der Research Collection der ETH Zürich verfügbar, mit DOI: [10.3929/ethz-b-000184480](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000184480)

Finanzierung

Das Projekt wurde vom Fonds zur Förderung der Wald- und Holzfor-schung (Projektnummer 2013.09) sowie den Waldämtern der Kantone Graubünden, Freiburg, St. Gallen, Tessin, Obwalden, Schwyz, Uri, Nidwalden und Wallis grosszügig unterstützt.

Dank

Wir danken den Feldaufnahmeteam (Yannick Pulver, Björn Dreier, Samuel Kneubühler, Valentina Vitali) für ihre Ausdauer und Sorgfalt bei der Datenerhebung. Jonas Stillhard und Christian Ginzler danken wir für die GIS-Unterstützung und die Schätzung der Baumhöhen, Markus Huber für die Datenbereitstellung aus dem LFI, Valentina Vitali für die Bearbeitung der Jahrringstudie und Paolo Cherubini für die Begleitung der Jahrringbeprobung und -analyse. Joachim Klädtke und ChaoFang Yue (FVA Freiburg i.Br.) danken wir für die Analyse von Zuwachsdaten. Jurij Diaci (Ljubljana) danken wir für das Überlassen von Verjüngungsdaten aus seiner Forschung. Auch den Förstern, die bei der Suche nach Verjüngungslücken mitgewirkt oder Informationen für gewählte Lücken zur Verfügung gestellt haben, sind wir zu Dank verpflichtet. Besonders nennen wollen wir die vier Förster, bei denen eine Jahrringbeprobung stattfand: Sigi Andreoli (Fläche Siat), Hans Bantli (Fläche Jenins), Stefan Lippuner (Fläche Furna), Mario Riatsch (Fläche Sur En). Ein besonderer Dank gilt dem WHFF und den genannten Ämtern, welche das Projekt finanziell unterstützt haben.

Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf

August 2017

INHALT

Kurzfassung	5
1 Ausgangslage und Ziele	9
2 Stand des Wissens	11
2.1 Wissensstand zu Zuwachsverlusten wegen verzögerter Verjüngung	11
2.2 Wissensstand zu Zuwachsreaktionen von Randbäumen	11
2.3 Wissensstand zu erhöhter Mortalität in unbehandelten Beständen	12
3 Überblick über die untersuchten Lücken	12
4 Einfluss grosser Lücken auf die Verjüngung	16
4.1 Methoden	16
4.2 Datenumfang	18
4.3 Ergebnisse und Interpretation	18
4.3.1 Ergebnisse und Interpretation zur Stammzahl	18
4.3.2 Ergebnisse und Interpretation zur Präsenz	26
4.3.3 Ergebnisse und Interpretation zur Baumhöhe	28
4.3.4 Vergleich der Verjüngungskennzahlen mit Sollwerten	28
4.3.5 Gründe für das Erreichen bzw. Verfehlen von Stammzahl-Sollwerten der Verjüngung	32
5 Einfluss grosser Verjüngungslücken auf den Volumenzuwachs im verbleibenden Bestand ...	35
5.1 Methoden	35
5.2 Ergebnisse und Interpretation	36
5.2.1 Verlauf und Ausmass der Freistellungeffekte	36
5.2.2 Steuerung des Wachstums der Fichten	38
6 Einfluss einer langen Hiebsruhe auf den nutzbaren Zuwachs	40
6.1 Hintergrund und Methoden	40
6.2 Ergebnisse und Interpretation	40
7 Synthese und Ausblick	42
7.1 Naturverjüngung und Zuwachs von Randbäumen in grossen Lücken	42
7.2 Abschätzung der Auswirkung grosser Lücken auf den Holzzuwachs	42
7.3 Weitere Auswirkungen grosser Lücken und waldbauliche Bewertung	43
7.4 Ausblick und offene Fragen	43
Anhang I	
8 Literaturverzeichnis	45
9 Im Projekt erarbeitete Publikationen	48
Anhang II	
10 Ausführliche Methodenbeschreibung	1
10.1 Methoden zu Zuwachsverlusten von Randbäumen	1
10.2 Methoden zur Auswahl und Beschreibung von Verjüngungslücken	2
10.3 Methoden zum Einfluss grosser Lücken auf die Verjüngung	5

11	Im Text nicht dargestellte Ergebnisse	10
11.1	Beschreibung der Lücken	10
11.2	Ergebnisse zu Zuwachsverlusten von Randbäumen.....	10
11.3	Ergebnisse zum Einfluss grosser Lücken auf die Verjüngung	10
11.3.1	Modellierung der Pflanzenpräsenz	10
11.3.2	Modellierung der Verjüngungs-Stammzahl.....	12
11.3.3	Modellierung der Pflanzenhöhe	14
11.3.4	Weitere Ergebnisse zu Verjüngungs-Sollwerten	17
11.4	Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Deckungsgrad und Verjüngungsdichte	18
11.5	Modell zur Schätzung von Zuwachsverlusten infolge grosser Lücken	19
12	Datenablage	22
13	Objektblätter der Verjüngungslücken	23

ABKÜRZUNGEN UND DEFINITIONEN

BHD	Brusthöhendurchmesser: Stammdurchmesser eines Baumes in 1,3 m Höhe über Boden
Anwuchs	Kollektiv von Verjüngungspflanzen, die 10 bis 39 cm gross sind
Aufwuchs	Kollektiv von Verjüngungspflanzen, die 40 bis 129 cm gross sind
Deckungsgrad	Verhältnis der in der vertikalen Projektion überschirmten/bedeckten Fläche zur Gesamtfläche. Kann 100% nicht überschreiten
Dichte	Anzahl Objekte pro Flächeneinheit. Hier synonym zu →Stammzahl
Grundfläche	Stammquerschnittsfläche eines Baumes in 1,3 m Höhe über Boden bzw. Summe der Stammquerschnittsflächen aller Bäume eines Bestandes. Mass für die Bestandesdichte. Wird meist auf eine Fläche bezogen.
h_{dom}	Oberhöhe: mittlere Höhe der 100 stärksten Bäume pro ha
LB	Laubbaumarten
LFI	Landesforstinventar
Nachwuchs	Kollektiv von kleiner Bäumen ab 130 cm Höhe bis 12 cm BHD
NB	Nadelbaumarten
Präsenz	Synonym zu Deckungsgrad
Sämling	Verjüngungspflanze ab dem 2. Lebensjahr bis (und ohne) 10 cm Höhe
Stammzahl	Anzahl Stämme bzw. Bäumchen, Mass für die Bestandesdichte. Wird meist auf eine Fläche bezogen und ist dann synonym zu → Dichte.

Kurzfassung

Hintergrund und Projektziele

Seit rund 25 Jahren wird in Schweizer Gebirgswäldern zuweilen in Form von Kahlhieben eingegriffen, weil dies kurzfristige ökonomische Vorteile verspricht. Resultat sind Verjüngungslücken, die teilweise deutlich breiter als 20 m und teils auch mehrere 100 m lang sind (Abbildung 1). Solche Eingriffe waren in der Schweiz bisher unüblich; daher bestehen keine Erfahrungen und wissenschaftliche Grundlagen, um deren Folgen für den Holzzuwachs abschätzen zu können. Dieses Projekt sollte diese Wissenslücke für produktive Fichten- und Fichten-Tannenwälder mit grossem Fichtenanteil schliessen und prüfen, 1) ob sich in solchen Verjüngungslücken die Verjüngung verzögert einstellt, 2) ob in benachbarten Beständen mit langer Hiebsruhe vermehrt Mortalität auftritt und 3) ob die Bäume an den Schlagrändern stärker wachsen. Letzteres würde einer Zuwachsreduktion entgegenwirken. Im Zentrum des Projekts stand die Frage nach der Auswirkung grosser Verjüngungsöffnungen auf den langfristigen Holzzuwachs, die zu beurteilen und soweit möglich zu quantifizieren war (Abbildung 2). Andere Gründe für oder gegen das Schlagen grosser Lücken (Risiken von Folgeschäden, erhöhter Pflegeaufwand, verminderte Schutzwirkung, verminderte Holzerntekosten und Auswirkungen auf die Biodiversität) wurden nicht untersucht.

Projektziel: Einfluss grosser Verjüngungslücken auf den Holzzuwachs in Gebirgs-Nadelwäldern beurteilen



Abbildung 1. Beispiel eines starken Eingriffes mit Kleinkahlhieben im Gebirgswald (Sunnwald, Schiers GR).

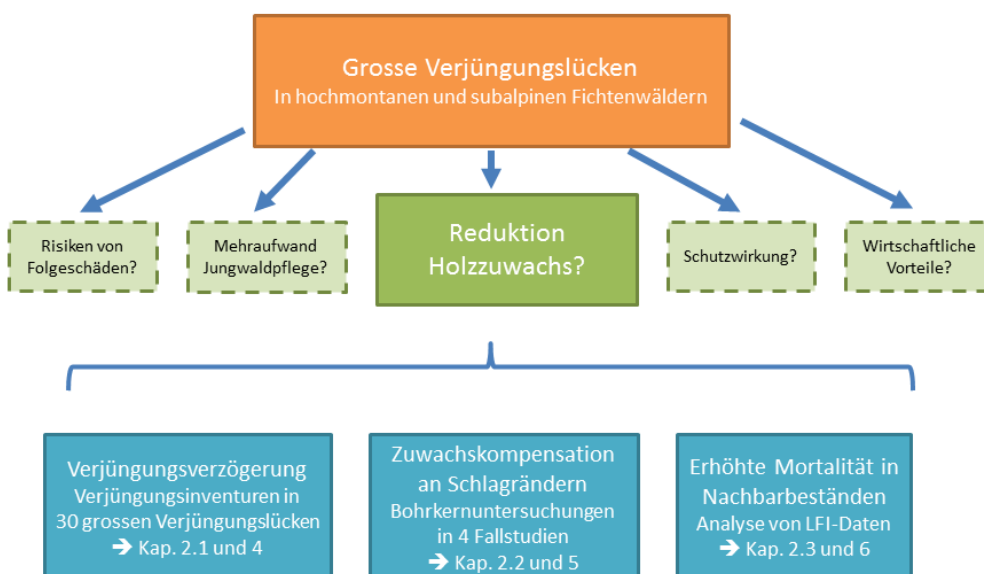


Abbildung 2. Konzept der Studie: Untersuchte (geschlossene Rahmen) und Beispiele für nicht untersuchte Teilaspekte (gestrichelte Rahmen).

Methoden

30 grosse Lücken im Alter von 8 bis 24 Jahren untersucht

Zur Charakterisierung der Verjüngung in grossen Lücken wurden die Präsenz (Deckungsgrad), die Stammzahl (Dichte) und die Höhe von Verjüngungspflanzen in 30 grossen Lücken untersucht. Es wurden alle Lücken mit 20 bis 80 m Breite berücksichtigt, die vor 8 bis 24 Jahren geschlagen worden später nicht erweitert worden waren. Zur Erfassung der Verjüngung und der Kleinstandorte mit und ohne Verjüngung wurden Linientransekte (90 Transekte mit 1448 Transektpunkten) mit 270 Probekreisen kombiniert. Zur Ergänzung der Stichprobe wurden an sogenannten Verjüngungspunkten zusätzliche Verjüngungspflanzen erfasst und bezüglich Kleinstandort charakterisiert. Die Auswertung fokussierte auf Fichtenverjüngung, die knapp 50% der Deckung und 64% der Stammzahl der erfassten Pflanzen ausmachte.

Mortalität bei langer Hiebsruhe mit LFI-Daten untersucht, Zuwachsreaktionen von Randbäumen mit Jahrringanalysen in vier Lücken.

Nach Hinweisen für vermehrte Mortalität bei langer Hiebsruhe wurde mit Inventurdaten von 1000 Probeflächen des Landesforstinventars gesucht. Zudem wurden in vier der 30 oben erwähnten Lücken Bohrkerne von Randbäumen und Bäumen im angrenzenden Bestand entnommen. Diese erlaubten es, die Reaktion der Bäume auf die Freistellung zu quantifizieren. Die Einflüsse der genannten drei Effekte auf den Holzzuwachs wurden mit einem einfachen Modell grob abgeschätzt.

Fichte verjüngt sich zahlreich, aber ihr Deckungsgrad ist gering

Fichtenverjüngung sehr variabel, Sämlinge häufiger als Anwuchs- und Aufwuchspflanzen

Die Naturverjüngung in den grossen Lücken, in deren Randbereich und im daran angrenzenden Bestand erwies sich als sehr variabel. Die Studie bestätigt in vielem, was zur Verjüngungsökologie der Fichte bekannt ist, zum Beispiel die grosse Bedeutung erhöhter Kleinstandorte und hemmender Konkurrenzvegetation. Sämlinge (< 10 cm) machten von der mittleren Stammzahl aller Fichten in Südexposition $10'934 \pm 1'719$ pro ha (in Nordexposition $13'827 \pm 1'925$ pro ha) 53% (47%) aus, Anwuchspflanzen (10-39 cm hoch) 25% (28%), Aufwuchspflanzen (40-129 cm) 14% (19%) und Nachwuchspflanzen (≥ 130 cm) 7% (7%). Kleine Pflanzen dominierten also in der Verjüngung. Die mittleren Deckungsgrade der Fichten lagen bei 5,6%, die aller Baumarten bei 11,4%. Die Vorverjüngung machte bei Flächen in Südexposition mindestens 13% aller Fichten-Jungpflanzen aus, bei Pflanzen mit Höhe ≥ 10 cm waren es 67%. In Nordexposition waren es 18% bzw. 66%.

Zwei Drittel der An- und Aufwuchspflanzen aus Vorverjüngung

Um Managementeffekte auf den Deckungsgrad und die Dichte der Fichtenverjüngung herauszuschälen, beschränkten wir uns für die statistische Analyse auf die Nachverjüngung mit Pflanzengrössen ≥ 10 cm, also auf Pflanzen, die sich erst nach dem Holzschlag etabliert und die sich in ihrer Umwelt bewährt, d.h. schon eine gewisse Grösse erreicht hatten.

Geringe Bewirtschaftungseffekte auf die Dichte der Fichten-Nachverjüngung

Nur wenige deutliche Bewirtschaftungseinflüsse auf Dichte und Deckungsgrad der Fichtenverjüngung

In den untersuchten grossen Lücken waren bei den mindestens 10 cm grossen Fichtenpflanzen der Nachverjüngung wenige Einflüsse der Bewirtschaftung deutlich: Die Pflanzen wiesen im Randbereich der Lücken einen geringeren Deckungsgrad auf als im Bestand, und ihre Stammzahl war in Nordexposition kleiner. Sämlinge (<10 cm) waren zwar in beiden Expositionen im Randbereich im Mittel häufiger in der Lücke; bei grosser Variabilität war der Effekt aber nicht signifikant. Ein solches Resultat hätte für kleinere Lücken gesprochen.

Mit zunehmender Dauer seit dem Eingriff erhöhte sich die Stammzahl der Fichtenpflanzen in Südexposition deutlich, in Nordexposition hingegen nicht. Die mittlere Pflanzenhöhe nahm in Südexposition mit zunehmender Dauer seit dem Eingriff generell zu, in Nordexposition hingegen nur in der Lücke und am Lückenrand und nicht im Bestand.

Geringer Verjüngungserfolg in grossen Lücken auf trockenen Standorten.

Effekte der Lückenbreite waren stark durch zwei ausserordentlich breite Lücken geprägt. Werden diese einbezogen, dann nahm die Stammzahl der Fichten-Nachverjüngung (Höhe ≥ 10 cm) mit zunehmender Breite zu, ebenso die mittlere Pflanzenhöhe und in Nordexposition auch der Deckungsgrad der Verjüngung. Eine vertiefte Betrachtung zeigt aber sehr tiefe Stammzahlen bei Lückenbreiten zwischen 50 und 70 m. Besonders gering war der Verjüngungserfolg in grossen Lücken, wenn Trockenheit für die Fichtenverjüngung limitierend ist, zum Beispiel in Südexposition, und auf steilen Hängen. Besonders hoch war der Erfolg auf verjüngungsgünstigen Standorten und bei zahlreicher Vorverjüngung.

Starker Verbiss verminderte die mittlere Pflanzenhöhe in Nordexposition. Auch die Lückenausrichtung hatte signifikante Effekte auf Deckungsgrad, Stammzahl und Höhe der Fichten-Nachverjüngung, die meisten Effekte scheinen aber wegen der geringen Lückenzahl wenig robust.

Starke Standorteffekte ergaben sich v.a. in Nordexposition bei der mittleren Pflanzenhöhe. Aufgrund der Standorttypen bildeten wir drei Standortgruppen; die Pflanzenhöhe war auf mittleren Standortverhältnissen gegenüber feuchten erhöht, bei trockenen Verhältnissen vermindert. Es zeigte sich auch ein starker Effekt der Höhenlage. Die Kleinstandorteffekte auf die Präsenz der Fichten-Nachverjüngung bestätigten Ergebnisse früherer Studien; zum Beispiel kam Verjüngung in Muldenlagen und auf nicht erhöhten Kleinstandorten seltener vor als auf kleinen Erhebungen.

Plausible Standorts- und Kleinstandorteffekte auf die Fichtenverjüngung

Fichtenverjüngung nach 8-24 Jahren in 40% der grossen Lücken erfolgreich und in 53% fehlgeschlagen

Zur Beurteilung des Erfolgs der Fichtenverjüngung aufgrund ihrer Stammzahl entwickelten wir Stammzahl-Sollwerte weiter, wobei wir Aufwuchspflanzen stärker gewichteten als die höherer Mortalität unterworfenen Anwuchspflanzen. Diese Beurteilung im sogenannten Verjüngungsdiagramm ergab, dass die Fichtenverjüngung 8 bis 24 Jahre nach dem Holzschlag in rund 40% der Lücken erfolgreich war, in 7% der Lücken möglicherweise in wenigen Jahren noch gelingt und in 53% der Lücken fehlschlug. Bei Einbezug anderer Baumarten erhöhte sich der Anteil erfolgreich verjüngter Lücken auf 57%, der mit Fehlschlag verminderte sich auf 33%. In den Lücken mit fehlgeschlagener Verjüngung ist damit zu rechnen, dass sie mehrere Jahrzehnte lang spärlich bestockt bleiben. In Lücken mit erfolgreicher Fichtenverjüngung war im Mittel reichlich Vorverjüngung vorhanden.

Verjüngungsdiagramm: eine neue Sollwertbetrachtung, die zwischen An- und Aufwuchs differenziert

Der Vergleich der hier gefundenen Ergebnisse mit einer Studie in schmalen Verjüngungsschlitzten in der Surselva (Hirsiger et al. 2013)¹ ergibt keinen eindeutigen Vorteil kleiner Lücken. Dies deutet darauf hin, dass nicht primär die Lückengrösse den Verjüngungserfolg bestimmt, sondern dass andere Faktoren wie Vorverjüngung, Verjüngungsgunst des Standortes und Wildverbiss dafür ähnlich wichtig sein können. Jedoch ist unklar, inwiefern die kleinen Lücken in der Surselva (Hirsiger et al. 2013) als «Best Practice» für die Verjüngung der Fichte betrachtet werden können (u.a. bzgl. Wildeinfluss), und weitere Studien mit vergleichbaren Daten zu kleinen Verjüngungsöffnungen existieren bisher nicht.

Kein eindeutiger Verjüngungsvorteil kleiner Lücken

Fichten reagieren auf Freistellung am Lückenrand

Die Randbäume reagierten auf die Freistellung in einer der untersuchten Lücken stark mit einem im Mittel um 60% erhöhten Zuwachs, in zwei Lücken schwach und in einer Lücke gar nicht. Stark freigestellte und dünne Bäume reagierten am stärksten. Die grosse Variabilität der Zuwachsreaktion, die mit nur vier Fallstudien nicht eindeutig auf bestimmte Gründe zurückgeführt werden kann, verunmöglicht allgemeine Aussagen zu deren Ausmass. Der Zuwachsschub dauerte wo nachweisbar nur etwa 10 Jahre an.

Variable und nur vorübergehende Zuwachsreaktion der Lücken-Randbäume

Lange Hiebsruhe fördert Baummortalität nur geringfügig

Die Analyse der LFI-Daten ergab bei der Fichte nur schwache Zusammenhänge zwischen langer Hiebsruhe und Zuwachsverlust durch zunehmende Baummortalität. Es ist nicht auszuschliessen, dass solche Zuwachsverluste bei längerer Betrachtungsdauer (>50 Jahre, d.h. in Zukunft) auftreten, aber natürliche Störungsereignisse, die genutzte und ungenutzte Fichtenwälder in ähnlichem Mass betreffen, dürften allfällige Zusammenhänge verwischen.

Hiebsruhe und Baummortalität hängen bei Fichte kaum zusammen.

Zuwachsverluste wegen grossen Lücken?

Eine verlässliche Abschätzung der Zuwachsverluste mit einem Schätzmodell erwies sich wegen der grossen Variabilität der Ergebnisse als nicht machbar. Solche Verluste dürften v.a. dann auftreten, wenn die Verjüngung nur spärlich aufkommt, und sie dürften in nach Süden exponierten Hängen grösser sein als in nach Norden exponierten.

Zuwachsverluste wegen grosser Variabilität der Ergebnisse nicht verlässlich abschätzbar

¹ Hirsiger E, Gmür P, Wasem U, Wunder J, Brang P. 2013. 10 Jahre Erfolgskontrolle in schlitzförmigen Lücken. Wald Holz 94(3): 23-32.

Grosse Lücken bei reichlicher Vorverjüngung im Nichtschutzwald teilweise vertretbar

Bei fehlender Vorverjüngung ist das Risiko eines Fehlschlags der Verjüngung in grossen Lücken hoch

Die Ergebnisse dieser Studie erlauben keine generelle Vorhersage, in welchen Fällen breite Verjüngungslücken unproblematisch sind. Einige solche Lücken mit dichter Fichtenverjüngung zeigen, dass flächige Räumungen nicht in jedem Fall waldbaulich abzulehnen sind. Bei reichlicher Vorverjüngung, grosser Verjüngungsgunst des Standortes und geringem Huftiereinfluss sind sie im Nichtschutzwald vertretbar. Falls ausreichende Vorverjüngung fehlt, ist das Risiko eines Fehlschlags aber erheblich. Die Folge können während Jahrzehnten nur spärlich bestockte Lücken sein, zum Beispiel wegen starker Vegetationskonkurrenz. Für kleinere Lücken als die hier untersuchten spricht, dass ab etwa 50 m Lückenbreite viele Lücken sehr wenig Anwuchs und Aufwuchs aufwiesen. Wird ein Hang mit wenigen grossen Lücken verjüngt, nehmen zudem die eher verjüngungsgünstigen Schlagränder im Verhältnis zur Waldfläche eine geringe Fläche ein. Mit grossen Lücken gehen auch Handlungsspielräume verloren, weil in ihnen die Verjüngung nach dem Schlag in einem Zeitfenster von 10 bis etwa 30 Jahren ankommen sollte. Bei kleinen Lücken können im Gegensatz zu grossen Lücken allfällige lokale Misserfolge der Verjüngung durch Erfolge auf benachbarten Flächen, zu anderen Zeitpunkten, leichter kompensiert werden.

Grössere Handlungsspielräume bei kleinen Lücken

Forschungsbedarf zu Verjüngungsfragen im Gebirgswald

Das Projekt hat deutlich gezeigt, dass gewisse «Lehrmeinungen» im Gebirgswaldbau wissenschaftlich ungenügend abgestützt sind. Die bisherigen Forschungsergebnisse ermöglichen es in vielen Bereichen noch nicht, konkrete und robuste Empfehlungen zur waldbaulichen Behandlung von Gebirgsnadelwäldern bereitzustellen. Forschungsbedarf besteht insbesondere zu den nachstehend aufgeführten Fragen:

1. Bei welchen Waldstrukturen stellt sich (Vor)Verjüngung erfolgreich ein? Welche Rolle spielen dabei Randbereiche von Lücken (Schlagränder)? Bei welchem waldbaulichen Vorgehen stellt sich Vorverjüngung bei hohem Holzvorrat (und damit hohem Zuwachs und guter Schutzwirkung) ein?
2. Wie entwickeln sich nach einem Holzschlag die Verjüngung und der daraus entstehende Jungwald sowie die Kleinstandortsgunst (besonders Vegetation) in kleinen und grossen Lücken langfristig (d.h. über 30-50 Jahre)?
3. Welche Verjüngung ist mit Best Practice erreichbar? Entsprechen die in Hirsiger et al. (2013, Fussnote auf S. 7) dokumentierten Verjüngungszustände bereits der Best Practice?
4. Welche Indikatoren und Sollwerte (=Schwellenwerte für Indikatoren) sind für die Beurteilung von Verjüngung im einzelnen Bestand und in Inventuren geeignet? Wie müssen sie angewendet werden, um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen?

1 Ausgangslage und Ziele

Die angespannte wirtschaftliche Lage der Forstbetriebe (Bürgi & Pauli 2013) sowie die politischen Bestrebungen, die Holzressourcen vermehrt zu nutzen und dabei die im Vergleich zum Ausland hohen Holzvorräte abzubauen (Waldpolitik 2020, Bundesamt für Umwelt 2013), haben dazu geführt, dass seit rund 25 Jahren ausserhalb von Schutzwäldern in den Schweizer Alpen zuweilen sehr starke Eingriffe ausgeführt werden. Resultat sind Verjüngungsöffnungen mit Breiten über 30 m und Längen von bis zu mehreren 100 m, die waldbautechnisch Kahlhiebe² darstellen (Abbildung 3), weil der allfällig vorhandene Unterwuchs meist geräumt oder bei der Holzernte zerstört wird. Derart grosse Lücken dürfen in Schutzwäldern nicht geschlagen werden (Frehner et al. 2005). Sie waren im Schweizer Gebirgswald über Jahrzehnte hinweg unüblich; es wurde entweder selektiv genutzt (Durchforstung) oder im Rahmen der Gebirgspflenterung bzw. der Überführung in den Gebirgspflenterwald kleinflächig verjüngt. Ein Beispiel dafür sind die sogenannten Verjüngungsschlitzte (Streit et al. 2009, Hirsiger et al. 2013). Oft werden grosse Lücken damit begründet, dass der Holzschlag sonst nicht kostendeckend durchgeführt werden könnte. Es wird argumentiert, dass die Erntekosten pro Kubikmeter Holz v.a. bei Seilkranbringung mit steigendem Holzanfall sinken (Schweizerische Gebirgswaldpflegegruppe 2004). Allerdings nimmt dieser Effekt mit zunehmenden Erntemengen pro Laufmeter Seillänge stark ab und hängt u.a. auch vom Seilkranstyp (konventioneller oder Mobilseilkran), von der Zuzugsdistanz und von der Distanz zwischen benachbarten Holzschlägen ab.

Am Beispiel des Kantons Graubünden sei die Problemstellung illustriert: Das langfristige Nutzungspotenzial dürfte bei 600'000 m³ liegen (Amt für Wald und Naturgefahren et al. 2010). Dem standen von 2008-2012 jährliche Nutzungen von 400'000 m³ gegenüber (Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden 2012). In den letzten Jahrzehnten wurde auf etwa einem Drittel der Waldfläche stark genutzt, auf einem Drittel schwach, und in einem Drittel der Waldfläche fand keine Holznutzung statt. Ähnliche Verhältnisse dürften in weiteren Gebirgskantonen anzutreffen sein.

Grosse Verjüngungslücken in Gebirgswäldern: ein Problem?



Abbildung 3. Beispiele flächiger Räumungen mit Seilkran in Gebirgswäldern. 2a Sunniwald, Schiers GR, 2b Chäseggenlitz, Furna GR, 2c Olivone TI, 2d Davos GR.

² Kahlhieb = flächige Räumung einer Waldfläche. Diese waldbautechnische Definition ist vom «Kahlschlag» im juristischen Sinn zu unterscheiden, der einen Kahlhieb bezeichnet, der auf der Schlagfläche zu freilandähnlichen ökologischen Bedingungen führt.

Die langfristigen Auswirkungen grosser Verjüngungslücken auf den Holzzuwachs über mehrere Jahrzehnte (z.B. 50 Jahre) sind schwierig abzuschätzen. Es wird vermutet, dass die beschriebenen Kahlflächen eine Reihe von Folgen haben, die in der Summe langfristig zu Zuwachsverlusten führen:

1. Sie verjüngen sich nur langsam;
2. in benachbarten Flächen ohne jede Holznutzung (weil man auf das Gelingen der Verjüngen in den Lücken wartet) nimmt die Bestandesdichte kontinuierlich zu, weshalb dort vermehrt Mortalität auftritt;
3. die Randbäume der Verjüngungsöffnungen wachsen stärker.

Projektziel: Einfluss grosser Lücken auf den Holzzuwachs beurteilen

Ziel dieses Projekts war daher, den Einfluss grosser Verjüngungslücken auf den langfristigen Holzzuwachs zu beurteilen und soweit möglich zu quantifizieren. Damit sollten ertragskundliche Grundlagen zur Beurteilung der Auswirkungen solcher Eingriffe auf den Holzzuwachs geschaffen werden. Die Fragen sollten für produktive hochmontane und subalpine Fichten-(Tannen-)Wäldern und für Bestände mit grossem Fichtenanteil beantwortet werden. Es war zunächst geplant, durch Sturm geschaffene Verjüngungsflächen ganz auszuschliessen. Diese Einschränkung wurde später fallengelassen, weil es zu wenige geeignete Verjüngungslücken gab. Die Stichprobe an Lücken umfasst jetzt sieben Lücken (25%) mit Sturm- oder Borkenkäferinfluss.

Es sei hier klargestellt, dass sich das Projekt auf ertragskundliche Aspekte beschränkte. Für die Holzproduktion aus Waldeigentümersicht entscheidende ökonomische Grössen wie der nachhaltig erzielbare Gewinn pro Flächeneinheit wurden nicht betrachtet. Nicht untersucht wurden auch allfällige weitere negative Auswirkungen grosser Verjüngungslücken wie ein später erhöhter Pflegeaufwand und eine reduzierte Schutzwirkung gegen Naturgefahren.

Von den ursprünglichen Projektzielen mussten in Teilbereichen Abstriche gemacht werden:

- Insgesamt waren die Ergebnisse heterogener als erwartet. Dies führte bei nur 30 grossen Verjüngungsöffnungen mit einer Verjüngungsuntersuchung und bei nur 4 mit einer Zuwachsuntersuchung zu grossen Schätzfehlern.
- Anstelle des ursprünglich vorgesehenen komplexen Berechnungstools zur Abschätzung von Zuwachsverlusten wurde aufgrund der heterogenen Resultate ein einfaches entwickelt.

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse des Projekts zuhanden der Forstpraxis zusammen. Die Gliederung orientiert sich an den Fragen, wie sich grosse Verjüngungslücken auf die Verjüngung, auf die Mortalität in benachbarten ungenutzten Beständen und auf den Zuwachs der Randbäume auswirken. Ergänzende Informationen zu Methode, Datenauswertung, etc. sind im Anhang zu finden. Der Anhang enthält auch eine Charakterisierung der 30 untersuchten Lücken (Kap. 13 Objektblätter).

Initiiert hat das Projekt das Amt für Wald und Naturgefahren des Kantons Graubündens (R. Gordon). Neben ihm waren in der Projektleitung die Fachstelle für Gebirgswaldpflege (S. Zürcher, anfänglich noch R. Schwitter) und die WSL (P. Brang) vertreten. Methodenentwicklung, Datenauswertung und Interpretation erfolgten durch die WSL (P. Nikolova, V. Vitali). An der Datenerfassung beteiligt war neben der WSL auch die Fachstelle für Gebirgswaldpflege (Y. Pulver) sowie die Gadola AG (B. Dreier).

2 Stand des Wissens

2.1 Wissensstand zu Zuwachsverlusten wegen verzögerter Verjüngung

Schlecht untersucht sind Verjüngungsverzögerungen. Metslaid et al. (2007) geben zwar einen Literaturüberblick zur Frage, wie vorhandene Fichtenverjüngung auf plötzliche Freistellung reagiert und welche physiologischen Prozesse dafür verantwortlich sind. In unserem Projekt ging es aber oft um Nachverjüngung. Hinweise gibt die Studie von Hirsiger et al. (2013), wonach etwa 15 Jahre nach dem Schlagen kleiner Verjüngungsöffnungen erst etwa die Hälfte von ihnen mit einer als ausreichend dicht angesehenen Verjüngung bestockt ist. Gründe dafür können die für Gebirgswälder immer noch kurze Zeit seit dem Holzschlag, verjüngungshemmende Schlagvegetation (Hochstauden), die in aufgelichteten Beständen schon vor dem Schlag vorhanden ist oder sich rasch danach einstellt, oder ein starker Wildeinfluss sein.

Die grosse Schwierigkeit, eine Verjüngungsverzögerung und deren Ausmass nachzuweisen, liegt beim anzulegenden Massstab. Wieweit eine Verjüngung verzögert abläuft, lässt sich nur bei Festlegung einer Referenzentwicklung der Verjüngung festlegen. Die Versuche, solche Referenzen bzw. Sollwerte festzulegen, können bestenfalls als unausgereift bezeichnet werden. Es gibt Sollwerte für Stammzahlen im Aufwuchs (Bühler 2005, Schodterer 2001) und Nachwuchs (Duc & Brang 2003), für Verjüngungsansätze (Frehner et al. 2005, auf der Basis von Buchli 1997) und Deckungsgrade (Frehner et al. 2005, auf der Basis von Brang & Duc 2002). Die Stammzahlentwicklung von Verjüngungen hat Bachofen (2009) beschrieben. Oft wurden die genannten Sollwerte unterschiedlich je nach Waldtyp festgelegt, um Unterschieden in der Verjüngungsgunst und in der Geschwindigkeit der Waldentwicklung Rechnung zu tragen. Nicht bei allen Sollwerten ist zudem klar, auf welche Bezugsfläche sie sich beziehen (Lücke, Gesamtwald). Bei den meisten ist unklar, wie lange nach einem Eingriff sie erreicht werden sollen.

**Verjüngungs-
Sollwerte nicht
ausgereift**

2.2 Wissensstand zu Zuwachsreaktionen von Randbäumen

Der Zuwachs von Einzelbäumen und Beständen sind ertragskundliche Fragestellungen, die schon lange untersucht werden (z.B. Assmann 1961, Kramer 1988, Wenk et al. 1990, Utschig 2002, Pretzsch 2006). Es gibt viele Durchforstungsversuche, gerade mit der Fichte, in denen der Zusammenhang zwischen BHD, Standfläche und Einzelbaumzuwachs untersucht wurde. Bemerkenswert ist dabei, dass der maximale Bestandeszuwachs über mehrere Jahrzehnte bei mittleren Bestandesdichten erreicht wird (Assmann 1961, Pretzsch 2006). In vielen Versuchen wurden allerdings junge Bestände untersucht (z.B. Pfister et al. 2008, Wallentin & Nilsson 2011); ob deren Ergebnisse für die hier zu untersuchenden Baum- und Althölzer gelten, ist offen. Bräker & Baumann (2006) konnten mit einem sehr kleinen Datensatz (17 Fichten) zeigen, dass Fichten in Randstellung innert weniger Jahre 17% mehr Zuwachs leisteten als Bäume im Bestandesinneren. Die Zuwachsreaktion war nahe dem Stammfuss noch wesentlich grösser. Eine Studie in Litauen ergab, dass Kronen 10-60 Jahre alter Fichten nach Durchforstungen schon im Folgejahr zu expandieren begannen, die Expansion aber nach 3-5 Jahren bereits wieder stark zurückging (Juodvalkis et al. 2005). Ähnliches galt für den Durchmesserzuwachs. Aus derselben Studie wurde abgeleitet, dass Absenkungen der Grundfläche in 50-60 Jahre alten Beständen um mehr als 40-50% den Durchmesserzuwachs der Einzelbäume nicht mehr zu steigern vermögen (Juodvalkis et al. 2005).

Zuwachsreaktionen von Randbäumen an Hiebsrändern wurden erst vereinzelt untersucht, z.B. von Burton (2002) an *Picea glauca* in Kanada. Interessant sind in diesem Zusammenhang auch Untersuchungen zum Lichtwuchsbetrieb (Kramer 1988), einer sehr starken Hochdurchforstung, in deren Verlauf der Standraum ausgewählter Bäume extrem erweitert wird. Ein verwandtes Konzept ist der Schnellwuchsbetrieb, der insbesondere bei Fichte Anwendung fand (Wenk et al. 1990). Nach Wiedemann (1937) beeinflusst eine starke Durchforstung in Fichtenbeständen etwa ab einem Alter von 50 Jahren den Durchmesserzuwachs nur gering, mit 1-2 cm Mehrzuwachs innert 20 Jahren. Soll Starkholz in kürzeren Umtriebszeiten erzielt werden, ist ein Lichtschacht von mehreren Metern Breite nötig, damit lange Kronen ausgebildet werden können, die für dauernden grossen Durchmesserzuwachs Voraussetzung sind (Wiedemann 1936).

**Zuwachsreaktionen
auf Kahlhiebs erst
vereinzelt untersucht**

Die Wuchseffizienz der Fichte nimmt mit zunehmenden Kronen- und Standflächendimensionen ab (Dieler et al. 2008). Am effizientesten waren stets Bäume mit langen schmalen Kronen, bei denen

das Verhältnis der Kronenmantelfläche zum Kronenvolumen am höchsten war. Auf schlechteren Standorten kann nach dieser Studie die Fichte den Wuchsraum nicht optimal nutzen, wodurch die Wuchsleistung gering bleibt.

Insgesamt ist die Wachstumsreaktion von Fichten auf Freistellung an Schlagrändern sehr wenig untersucht. Dies überrascht, da Schlagränder sowohl im Femelschlag- als auch im Kahlschlagbetrieb regelmässig entstehen.

2.3 Wissensstand zu erhöhter Mortalität in unbehandelten Beständen

Die Mortalität von Bäumen am Rand von Lothar-Sturmflächen in der Schweiz untersuchte Rohrer (2006); er fand erhebliche Mortalität, die positiv mit dem BHD korrelierte und stark von der Baumart abhing. Nach dem Schlagen von Verjüngungsschlitzten erweiterten sich innert 15 Jahren rund ein Drittel der schlitzförmigen Öffnungen wegen Mortalität von Randbäumen stark (Hirsiger et al. 2013). Mortalität an Hiebsrändern in borealen Nadelwäldern untersuchten Burton (2002), in Restwäldchen auf Kahlschlagflächen Jönsson et al. (2007).

In Schweizer Versuchsflächen mit langer Beobachtungsdauer fanden Etzold et al. (2016) bei Fichten in Hochlagen (>1300 m ü.M.), dass die Mortalität mit dem BHD zunahm. Hingegen beeinflusste die Bestandesdichte die Mortalität nicht. In 59 Kernflächen von Naturwaldreservaten – wobei Flächen mit störungsbedingter Mortalität weitgehend ausgeschlossen wurden – fand Hülsmann (2016) hingegen eine Abnahme der Mortalitätsraten mit zunehmendem BHD.

Insgesamt gibt es bisher keine Evidenz für die naheliegende Vermutung, dass Nichtnutzung längerfristig zu konkurrenzbedingter Mortalität führt. Ob die Vermutung falsch ist oder die Folgen der Nichtbewirtschaftung sich erst sehr langfristig zeigen und daher in Schweizer Wäldern noch nicht beobachtet werden können, ist unklar.

Bisher kaum Evidenz für konkurrenzbedingte Mortalität bei ausbleibender Holznutzung

3 Überblick über die untersuchten Lücken

Für die Teilstudien zur Zuwachsreaktion und zur Verjüngung wurden Lücken in Fichten- und Fichten-Tannenwäldern ausgewählt. Die Kriterien für die Wahl der Lücken waren:

- Eingriffsjahr vor 2006 (ergibt 8-20 Jahre Dauer seit dem Schlag; gemäss Angaben des zuständigen Försters)
- Klarer Schlagrand: Als Schlagrand galt die Verbindung der Stammfüsse der lebenden Randbäume (geknickte Linie). Ausbuchtungen in Richtung der Lücke (Einzelbäume) und des Bestandes (Lücken), die kürzer als 15 m waren, wurden nicht berücksichtigt.
- Lückenbreite 20-60 (90) m, gemessen mit Vertex oder Laser-Distanzmessgerät. Bei variabler Lückenbreite wurden die an 2 bis 3 Stellen gemessenen Breiten gemittelt.
- Lückenlänge ≥ 50 m, gemessen mit Vertex oder Laser-Distanzmessgerät
- Grundflächenanteil der Fichte im angrenzenden Bestand $\geq 80\%$, geschätzt
- Höchstens geringfügige Erweiterung der Lücke nach dem Eingriff durch weitere Eingriffe oder Störungen
- Keine Anzeichen von Pflanzungen
- Keine Anzeichen von Jungwaldpflegeeingriffen
- Standort in der Lücke einigermaßen homogen (Neigung, Exposition, Wasserhaushalt)
- Produktive Fichten- oder Tannen-Fichten-Standorte der subalpinen oder hochmontanen Höhenstufe.

Die Suche nach geeigneten Lücken erwies sich als schwierig. Eine schriftliche Umfrage bei den Forstdiensten ergab nicht genügend und teils den Kriterien nicht entsprechende Lücken. Eine schweizweite Suche in Fichten- und Fichten-Tannenwäldern auf Luftbildern (map.geo.admin.ch) führte schliesslich zu einer Stichprobe von 30 geeigneten Lücken (Abbildung 4), die sich vorwiegend in den Zwischen- und Innenalpen befinden, vom Unterwallis bis ins Engadin. Diese Stichprobe umfasste alle (!) im Jahr der Auswahl (2014) gefundenen Lücken. Die ursprünglich angestrebte Anzahl von 50 Lücken

30 Verjüngungslücken in Fichten- und Fichten-Tannenwäldern untersucht

war nicht erreichbar. Die häufigsten Ausschlussgründe waren ein zu geringes Lückenalter, unscharfe Schlagränder und spätere Erweiterungen.

Für jede Lücke wurden Eigenschaften wie Höhenlage, Hangexposition, Lückenrichtung, Standorttyp etc. erfasst (Details s. Anhang, Kapitel 10.2). Die untersuchten Lücken lagen in Höhenlagen von 1486 ± 38 m (Mittelwert \pm einfacher Standardfehler), bei Werten zwischen 992 und 1836 m. Lücken mit Exposition Nord (von West über Nord bis Ost) waren mit 19 häufiger als solche in Südexposition mit 11 (Abbildung 5). Die Hangneigung lag zwischen 30 und 85%. 11 der 30 Lücken lagen in feuchten Standorttypen (teils mit Präsenz von Hochstauden), 7 auf trockenen Standorten, 12 im mittleren Bereich (Abbildung 6). Das Alter der Lücken betrug im Mittel 14 ± 1 Jahre (Minimum: 7 Jahre, Maximum 24 Jahre). Die Lücken waren im Mittel 46 ± 4 m breit und 276 ± 32 m lang (Abbildung 7).

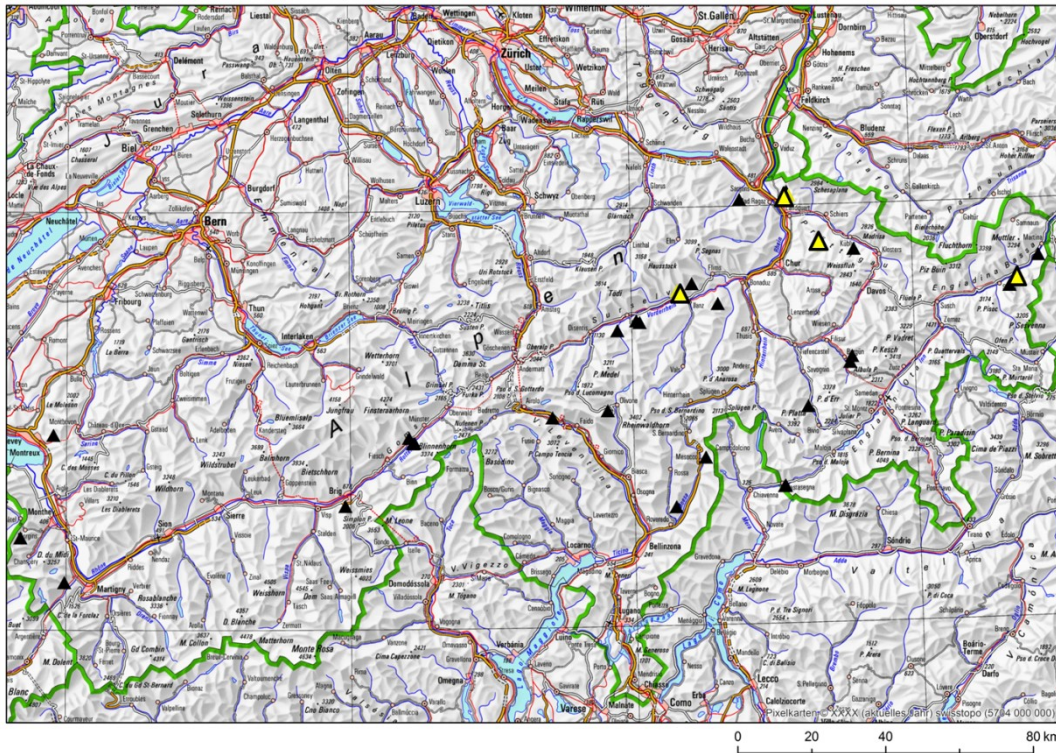


Abbildung 4. Geografische Lage der untersuchten Lücken. ▲ Lücke. ▲ Lücke mit Zusatzuntersuchung zur Zuwachsreaktion von Randbäumen.

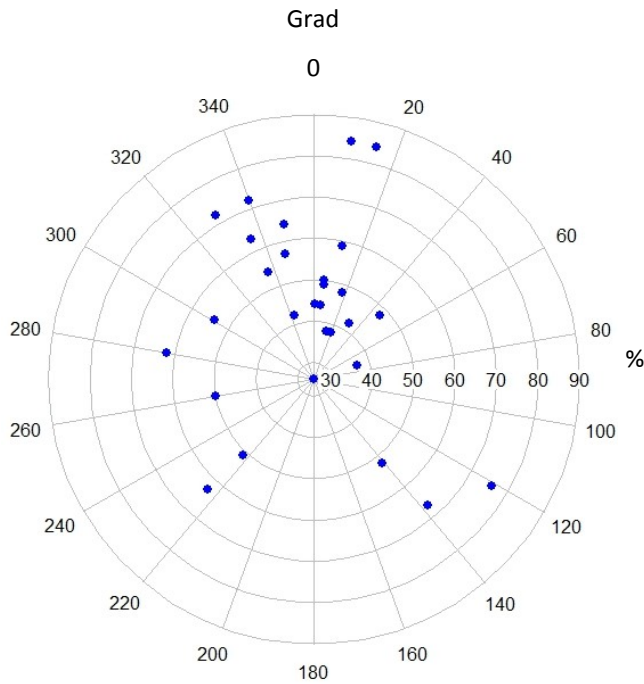


Abbildung 5. Hangexposition und Hangneigung der untersuchten Lücken.

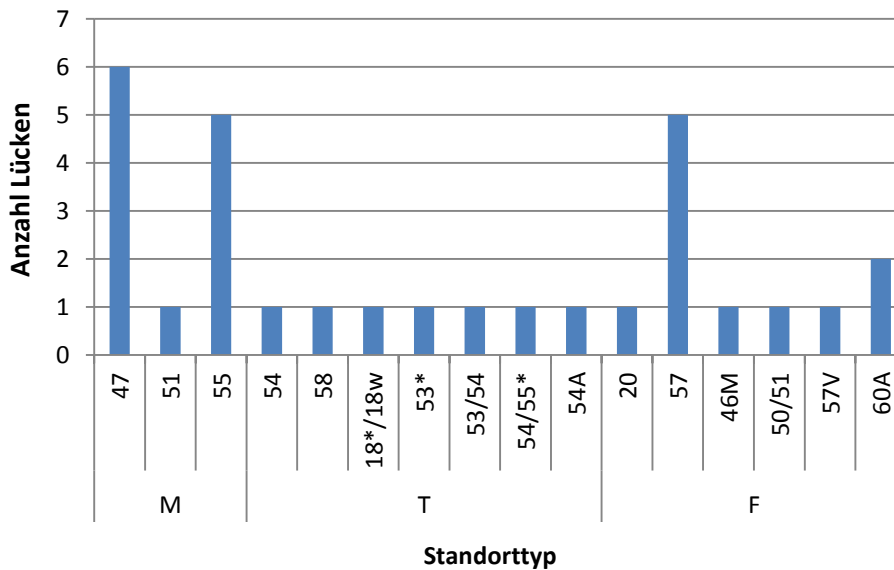


Abbildung 6. Häufigkeit von Standorttypen in der Stichprobe von 30 Lücken. Die Ziffern stehen für die Bezeichnung der Standorttypen in Frehner et al. (2005). F = Hochstauden und sonstige Standorttypen mit Moderholzverjüngung, M = mittlere Standorttypen und solche mit Vergrasungsproblematik, T = Standorttypen mit Austrocknungsproblematik.

Himbeeren in Lücken mit 55% Deckung

Die Vegetation unterschied sich deutlich zwischen den Lücken auf der einen Seite und den Randbereichen und dem Bestandesinneren auf der anderen Seite (Abbildung 8). In den Lücken erreichten Himbeeren sowohl in Süd- als auch in Nordexposition eine Deckung von rund 55%, während von den übrigen Vegetationstypen keiner besonders häufig war. In den Randbereichen und im Bestandesinneren unterschied sich die Vegetation stark nach Exposition: In Südexposition traten Streuauflagen, Moose und Reitgras am häufigsten auf, in Nordexposition eine Krautvegetation.

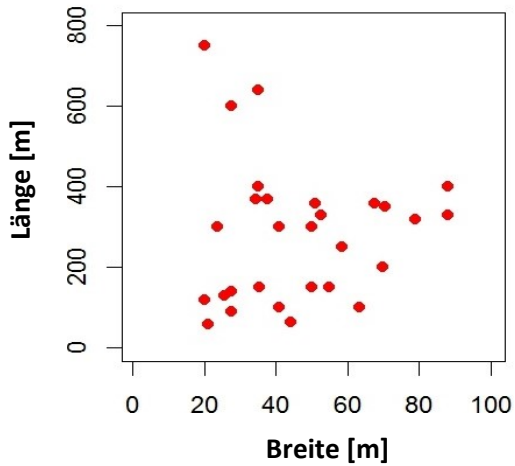


Abbildung 7. Länge und Breite der untersuchten Lücken.

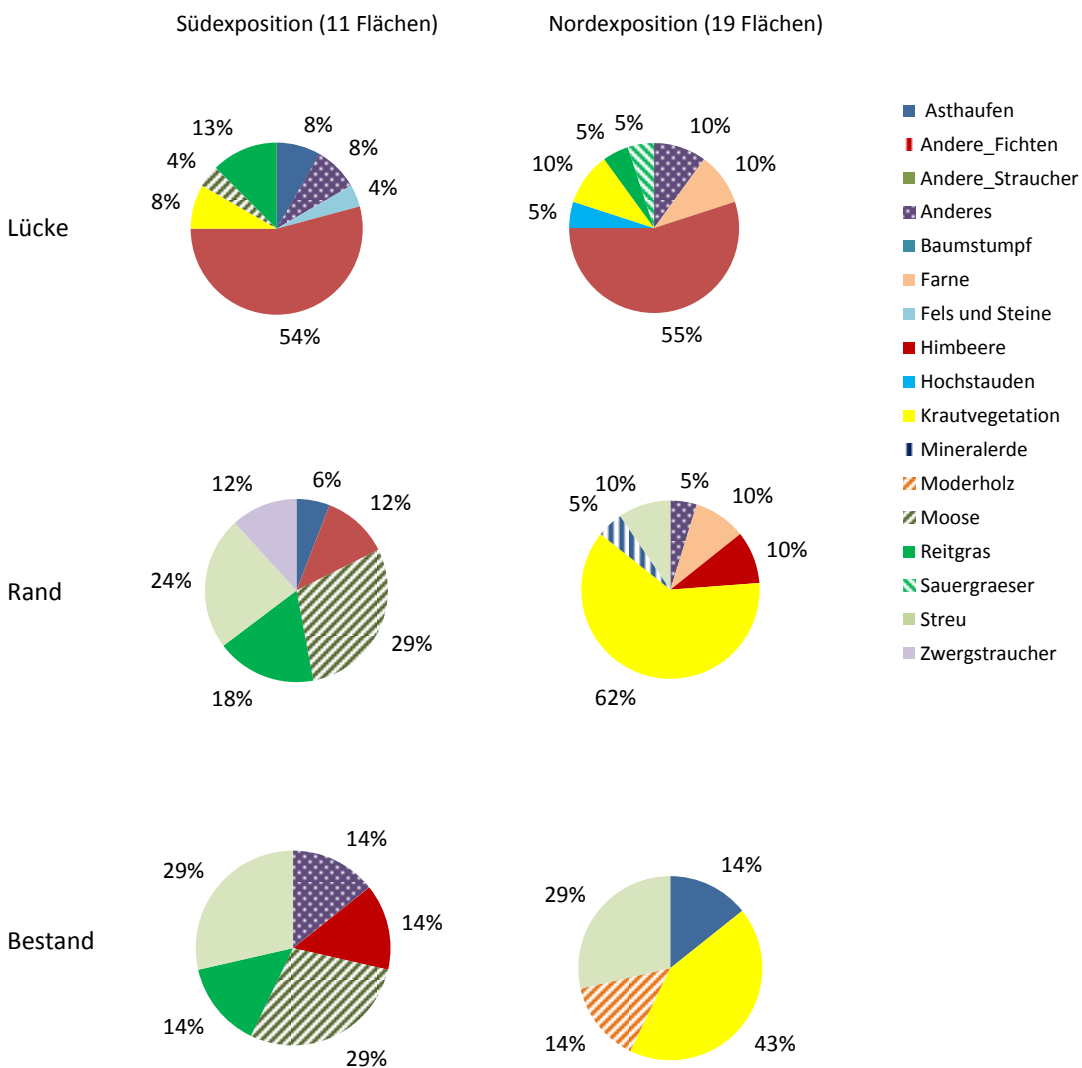


Abbildung 8. Häufigkeit der Vegetationstypen in 30 Flächen, aufgetrennt nach Lücke, Randbereich und angrenzendem Bestand.

4 Einfluss grosser Lücken auf die Verjüngung

4.1 Methoden

Mit der Verjüngungsinventur wurden die Präsenz, Stammzahl, Grösse und Baumartenzusammensetzung und die Umweltbedingungen der Verjüngungspflanzen erfasst. Die Methode zielte darauf ab, 1) Zusammenhänge statistisch zu modellieren und 2) die Verjüngung repräsentativ zu erfassen. Für die statistische Modellierung muss die Datenmenge in unterschiedlichen Situationen – auch in selten vorkommenden – genügen, für das repräsentative Bild ist eine zufällige Erfassung der untersuchten Objekte Voraussetzung. Aufgrund dieser unterschiedlichen Anforderungen entschieden wir uns für eine Kombination von drei Inventurmethode (methodische Details s. Anhang Kap. 10).

Linientransekte zur Erfassung der Deckung von Verjüngungspflanzen und von Kleinstandorten

Mit Linientransekten erfassten wir die Frequenz von Verjüngungspflanzen und Kleinstandortseigenschaften (Abbildung 9). Es wurden drei Transekte pro Lücke senkrecht zum Schlagrand gelegt, die in die angrenzenden Bestände hineinreichten und auf denen 16 Transektpunkte lagen. Der Abstand in der Lücke wurde (einheitlich in den 3 Transekten) im Bereich von 2 bis 6 m so gewählt, dass etwa 10 Transektpunkte jedes Transektes in die Lücke fielen; im Bestand war der Abstand 6 m. An jedem Punkt wurde der Kleinstandort bzw. die Präsenz der Verjüngung beurteilt. Jede Verjüngungspflanze ordneten wir aufgrund von Astquirlen bzw. Knospenschuppennarben einer der drei Kategorien «Vorverjüngung», «Nachverjüngung» oder «mit unsicherer Zuordnung» zu. Aus der Häufigkeit der erfassten Kategorien lassen sich Deckungsgrade ableiten. An jedem ersten und letzten Transektpunkt erfassten wir zusätzlich die Grundfläche des angrenzenden Bestandes mit der Methode nach Bitterlich.

Probekreise zur Erfassung der Verjüngungsstammzahl

Auf kreisförmigen Probeflächen von 20 m² Ausdehnung (2,52 m Radius) wurde die Stammzahl (Stammzahl) der Verjüngung erfasst; von den neun Probeflächen pro Fläche sollten sechs in der Lücke liegen. Dabei wurde nach Grössenklassen und Baumarten unterschieden. Das Zentrum jeder Probefläche lag auf einem Transektpunkt.

Auf 15 Verjüngungspunkten pro Fläche wurden weitere Verjüngungspflanzen erfasst, um die Stichprobe der Fichten, Lärchen und Tannen (und nur dieser Baumarten) aus den Transekten zu vergrössern und so die statistischen Modelle zu verbessern. Hierbei wurde die dem Transektpunkt jeweils nächst liegende Pflanze je Grössenklasse in maximaler Distanz von 3,99 m gesucht und nach denselben Methoden wie auf den Linientransekten angesprochen.

An Kleinstandortseigenschaften an jedem Transektpunkt und bei jeder Verjüngungspflanze erfassten wir die Vegetationsbedeckung häufiger Typen, das Mikrorelief, die Distanz zum nächsten Stock sowie die Überschildung durch adulte Bäume. Die Position der Transektpunkte, Verjüngungspunkte und Probeflächen im Verhältnis zu den Lücken legten wir so fest, dass der Punkt, der dem Lückenrand am nächsten lag und die beidseits benachbarten Punkte (also total sechs pro Transekt) dem Rand zugeteilt wurden. Daraus ergab sich die Zuteilung der übrigen Punkte zur Lücke bzw. zum Bestand.

Die Daten wurden deskriptiv und mit statistischen Modellen (GLM (general linear model) und zero-inflated regression model) ausgewertet. Bei der Variablenselektion in den Modellen wurden Faktoren, welche aufgrund der Fragestellung getestet werden sollten, sowie signifikante Variablen im Modell belassen, die übrigen ausgeschlossen. Details zu den statistischen Modellen sind im Anhang (Kapitel 11) dargestellt.

Die in 17 Kategorien aufgenommene dominierende Bodenbedeckung auf den Linientransekten (N=2089) wurde nachträglich in 7 Deckungskategorien zusammengefasst:

1. Anderes (95) in «Anderes»
2. Fels und Steine, Mineralerde (62+3) in «Felsen»
3. Moose, Zwergsträucher, Sauergräser und Andere Fichten (230+133+122+22) in «fördernd»
4. Reitgras, Himbeere, Farne, Hochstauden und andere Sträucher (315+211+112+54+26) in «hemmend»
5. Krautvegetation (254) in «Kraut»

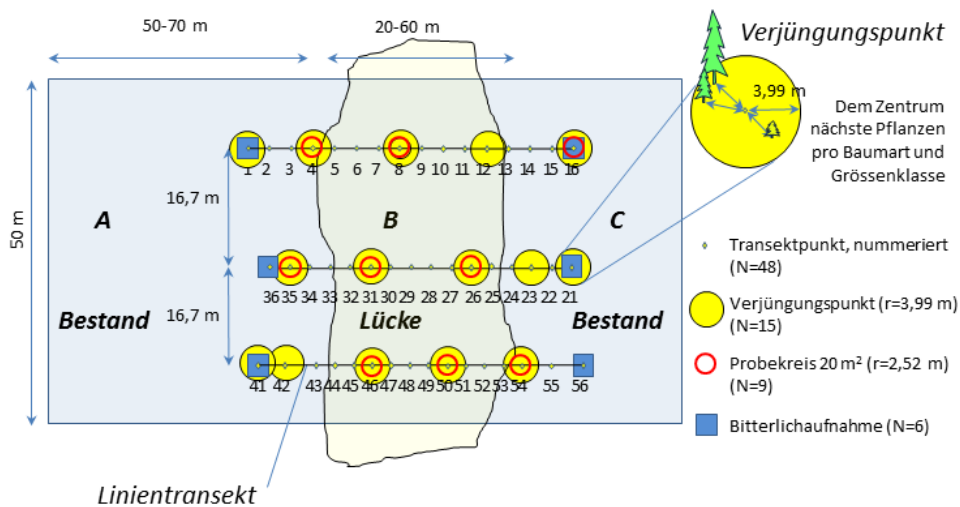
6. Baumstumpf, Moderholz und Asthaufen (27+58+58) in «organisch»

7. Streu (307) in «Streu»

Die Gruppe der «fördernden» Pflanzen wurde gebildet aus Arten, die die Naturverjüngung der Fichte in der Regel fördern und die eher auf sauren und nährstoffarmen Böden wachsen. Diese Zuordnung wurde aufgrund der Daten deskriptiv überprüft. In der Gruppe der hemmenden Pflanzen wurde Bodenbedeckung zusammengefasst, die die Fichten-Naturverjüngung behindert. Damit sind die Begriffe «fördernd» und «hemmend» auf die Verjüngung der Fichte zu beziehen.

Es sei betont, dass zwischen der deskriptiven Beschreibung der Daten (in Tabellen oder Grafiken) und der statistischen Modellierung Widersprüche auftauchen können. Statistische Modelle können Wechselwirkungen zwischen Faktoren adäquat abbilden, was in Grafiken nicht möglich ist.

a



b

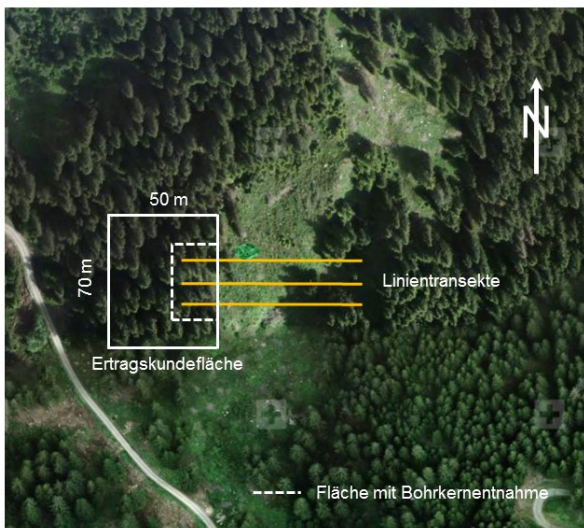


Abbildung 9. Inventurdesign. a Schema des Inventurdesigns, b Lage der Transekte im Beispiel der Lücke in Siat GR. Zusätzlich zu den Linientransekten sind die Flächen für die Teilstudie zur Zuwachsreaktion von Randbäumen eingezeichnet. Die Orthophoto in Abbildung 9b stammt von swissimage ©2015 swisstopo [5704000000]).

4.2 Datenumfang

Umfangreiche Verjüngungs- und Kleinstandortsdaten aus 30 Verjüngungslücken

Insgesamt wurden in den 30 untersuchten Verjüngungslücken 1448 Transektpunkte beurteilt und auf 270 Probekreisen mit 1,35 ha Gesamtfläche 10'947 Verjüngungspflanzen erfasst, darunter 6'958 Fichten (64%) (Tabelle 1). Nur an 81 der 1448 Transektpunkte war Fichtenverjüngung präsent. Zur Vergrösserung dieser Stichprobe erfassten wir daher mit Zufallsauswahl weitere 487 Fichtenjungpflanzen auf Verjüngungspunkten. Der Umfang der erhobenen Daten erlaubt eine gute Charakterisierung 1) der Kleinstandorte in den Lücken und in deren unmittelbarer Umgebung (über die Transektpunkte bzw. die Verjüngungspunkte) und 2) der Häufigkeit und Grössenverteilung der Fichtenverjüngung und von deren Abhängigkeit von ihrer Umwelt. Da 11 Verjüngungslücken in Südexposition lagen und 19 in Nordexposition, teilen sich die Daten etwa zu 35% auf südlich und zu 65% auf nördlich exponierte Hänge auf. Für die Bildung von Straten – z.B. der Fichtennachverjüngung nur in Lücken an Südhängen – ist der Datenumfang teilweise unterkritisch. Für Analysen der Verjüngung anderer Baumarten ist der Datenumfang zu gering, besonders weil diese ökologisch unterschiedlich sind und daher Analysen zu ihrer Gesamtheit wenig sinnvoll sind.

Tabelle 1. Datenumfang in der Verjüngungsstudie. Vorverj. = Vorverjüngung, Unsicher = ohne Zuordnung zu Vor- oder Nachverjüngung, Nachverj. = Nachverjüngung.

Transektpunkte	Total	Lücke	Rand	Bestand
Total Anzahl Punkte	1448	656	559	233
Anzahl Punkte mit Verjüngung	165	82	57	26
Anteil Punkte mit Verjüngung [%]	11.4	12.5	10.2	11.2
Anteil Punkte mit Fichtenverjüngung [%]	5.6	4.7	5.4	8.6
Anteil Punkte mit Fichtenvorverjüngung [%]	3.5	2.7	3.4	5.6
Anteil Punkte mit Fichtennachverjüngung [%]	2.1	2.0	2.0	3.0
Anteil Punkte mit Verjüngung anderer Baumarten [%]	5.8	7.8	4.8	2.6
Anzahl Punkte mit Fichtenverjüngung	81	31	30	20
Anzahl zusätzliche Pflanzen von Verjüngungspunkten / davon Fichten	641/487	293/214	196/151	152/122
Verjüngungspflanzen in den Probekreisen				
Anzahl Verjüngungspflanzen	10'947			
Anzahl Verjüngungspflanzen anderer Baumarten	3'989			
Anzahl Fichten-Jungpflanzen	6'958	3'470	2'562	926
Anzahl Fichten-Jungpflanzen nach Verjüngungszeitpunkt		Vorverj. 936	Unsicher 286	Nachverj. 5'736

4.3 Ergebnisse und Interpretation

Deckungsgrad und Stammzahl als Zielgrössen

Für das Verständnis der Ergebnisse ist es wichtig, die Zielgrössen Deckungsgrad und Stammzahl (=Dichte) zu verstehen. Der Deckungsgrad gibt an, welcher Anteil des Waldbodens von Verjüngung überschirmt ist, wobei Mehrfachüberschirmung nur einmal gezählt wird. Die Stammzahl ist ein direktes Mass für die Anzahl Individuen pro Flächeneinheit.

Zudem sind je nach Fragestellung die jeweils aussagekräftigen Daten auszuwählen, z.B. nur die Daten aus den Lücken, während diejenigen von Bestandesrand und Bestand weggelassen werden, nur Daten zu den Fichten oder zur Nachverjüngung, oder nur Daten zu etablierten Pflanzen (Aufwuchs, Höhe ≥ 40 cm).

4.3.1 Ergebnisse und Interpretation zur Stammzahl

Wir stellen die Stammzahl für alle Baumarten und nur für die Fichte dar, die wichtigste Zielbaumart in den untersuchten Lücken. Die Datengrundlage sind 9 Probekreise pro Untersuchungsfläche. Wir gingen von folgenden Hypothesen aus, von denen einige sich auf die Bewirtschaftung beziehen (1-2, z. T. 6), andere auf den «Makrostandort» (3-5) und weitere auf den Kleinstandort (6-9):

1. Je breiter eine Lücke ist, desto spärlicher ist die Verjüngung.
2. Je länger der Holzschlag zurückliegt, desto mehr Verjüngung und desto mehr Verjüngung in grösseren Grössenklassen sind vorhanden.
3. In Lücken an südexponierten Hängen ist weniger Verjüngung vorhanden als in solchen in Nordexposition.

4. Je höher eine Lücke liegt, desto weniger Verjüngung ist vorhanden.
5. Auf wasserlimitierten Standorten ist weniger Fichtenverjüngung vorhanden.
6. Je stärker die Vegetation insgesamt und je stärker bestimmte Vegetationstypen heute die Lücke bedecken, desto weniger Verjüngung ist vorhanden. Es gibt aber auch Vegetationstypen mit besonders viel Verjüngung.
7. Auf überschirmten Kleinstandorten ist weniger Verjüngung vorhanden als auf nicht überschirmten; unmittelbar am Schlagrand ist die Vegetation für lange Zeit weniger deckend und daher sind hier mehr Sämlinge (und später auch mehr Anwuchs/Aufwuchs) vorhanden.
8. In Stocknähe ist mehr Verjüngung vorhanden als an stockfernen Kleinstandorten (weil diese gerade nach dem Schlag noch (ganz oder nahezu) vegetationsfrei waren).
9. Auf erhöhten Kleinstandorten ist mehr Verjüngung vorhanden als auf anderen Kleinstandorten.

Die Stammzahl der Verjüngungspflanzen insgesamt und der Fichten alleine variierte stark zwischen den Lücken (Abbildung 10). Die Betrachtung einzelner Boxplots zeigt auch die grosse Variation innerhalb jeder Lücke³. In vielen Flächen treten einzelne Probekreise mit grosser Stammzahl auf (>10'000/ha, kleine Kreise oberhalb der Box); diese würden den Mittelwert jeder Fläche stark erhöhen. Daher arbeiten wir bei Auswertungen oft mit dem robusten Median, wobei in Tabelle 2 beide zu Vergleichszwecken aufgeführt sind. Es zeigt sich auch, dass in einzelnen Lücken die Fichte in der Verjüngung dominiert (z.B. Südexposition: Selkingen, Troistorrents, Sumvitg), während in anderen Lücken andere Baumarten vorherrschen (z.B. Nordexposition: Montreux, Bondo1, Brig).

Grosse Variation der Verjüngungsstammzahl – daher Verwendung des Medians neben dem Mittelwert

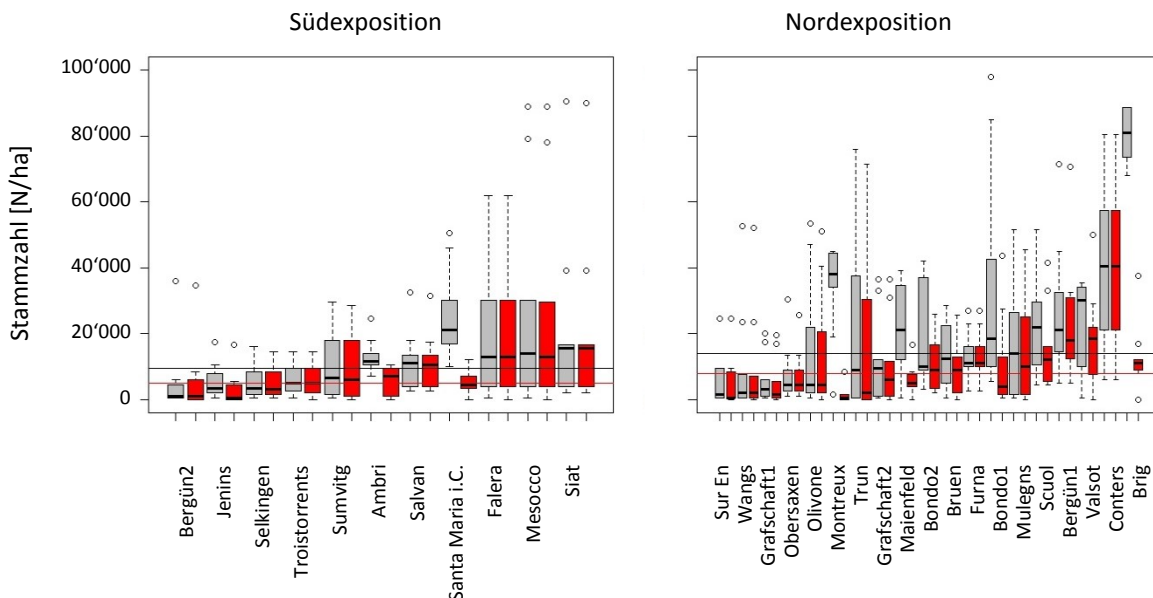


Abbildung 10. Stammzahl der Verjüngungspflanzen aller Grössenklassen für alle Baumarten (in Grau) und für Fichte (in Rot) pro Fläche, links Flächen in Südexposition, rechts Flächen in Nordexposition. Die schwarzen horizontalen Linien zeigen den Median für alle Verjüngungspflanzen (Südexposition: 9'500/ha, Nordexposition: 14'000/ha), die roten Linien denjenigen für die Fichten (5'000/ha bzw. 8'000/ha).

Die Verjüngung ist in Südexposition weniger dicht als in Nordexposition (Tabelle 2), was schon aus früheren Studien in Fichtenwäldern bekannt ist (Streit et al. 2009) und Hypothese 3 der vorliegenden Studie bestätigt. Werden Pflanzen aller Grössen, vom Sämling bis zur Nachwuchsstange, berücksichtigt, beträgt der Median der Stammzahl aller Baumarten (bzw. der Fichten) in Südexposition 9'500/ha (5'000/ha), in Nordexposition 14'000/ha (8'000/ha). Die Stammzahl der Verjüngungspflanzen nimmt mit zunehmender Grösse deutlich ab.

Höhere Verjüngungsstammzahl in Nord- als in Südexposition

³ Die Probeflächengrösse von 20 m² bewirkt, dass eine zusätzliche Pflanze die Dichte um 50/ha erhöht.

Tendenziell grösste Fichten-Stammzahl im Randbereich der Lücken

Fichten aller Grössenklassen zusammen waren im Randbereich der Lücken am häufigsten (Abbildung 11 oben). Am wenigsten häufig waren sie in südlicher Hangexposition in den Lücken, in nördlicher Hangexposition im Bestand (Abbildung 11 oben). In kleinen Verjüngungsschlitzten in der Surselva wurden hingegen in den Schlitzten (der Lücke in dieser Studie vergleichbar) rund 50% mehr Fichtenjungpflanzen gefunden als im Randbereich der Lücken (dort «Bestand» genannt; Abb. 6 in Streit et al. 2009). Bei den Fichten der Nachverjüngung mit Höhe ≥ 10 cm (also ohne die zahlreichen Sämlinge, Tabelle 2) kamen tendenziell (nicht signifikant) im Bestand am wenigsten Bäumchen auf, während Lücke und Randbereich nahe beieinander (Abbildung 11 unten).

Tabelle 2. Stammzahl der Verjüngung nach Grössenklasse und Hangexposition in 30 Verjüngungslücken (alle Positionen: Lücke, Randbereich, Bestand). Angegeben sind Mittelwerte \pm Standardfehler und in Klammern der Median. Die Angaben beruhen auf 99 (Südexposition) bzw. 171 (Nordexposition) Probekreisen.

	Südexposition		Nordexposition	
	Alle Baumarten	Fichte	Alle Baumarten	Fichte
Sämlinge (<10 cm)	6'803 \pm 2'033 (1'000)	5'843 \pm 1'397 (1'000)	9'202 \pm 1'728 (2'000)	6'444 \pm 1'050 (1'500)
Anwuchs (10-39 cm)	3'414 \pm 635 (1'500)	2'782 \pm 506 (1'000)	7'085 \pm 2'069 (2'000)	3'828 \pm 650 (1'000)
Aufwuchs (40-129 cm)	2'535 \pm 553 (1'000)	1'581 \pm 353 (0)	5'760 \pm 1'844 (1'000)	2'576 \pm 581 (500)
Nachwuchs (≥ 130 cm)	1'076 \pm 286 (0)	727 \pm 204 (0)	1'956 \pm 707 (0)	979 \pm 330 (0)
Total	13'919 \pm 2'534 (9'500)	10'934 \pm 1'719 (5'000)	24'067 \pm 169 (14'000)	13'827 \pm 1'925 (8'000)

Bei Lückenbreiten unter 50 m war in den Lücken die Verjüngungsstammzahl im Anwuchs grösser als bei Breiten zwischen 50 und 70 m (Abbildung 12), damit wird Hypothese 1 für den Grossteil der Lücken bestätigt. In einer sehr breiten Lücke (Breite 71 m) war, im Gegensatz zu allen anderen Lücken, der Aufwuchs zahlreicher vorhanden als der Anwuchs. Der Grund dafür dürfte nicht ein grösserer Anteil an Vorverjüngung sein, denn andere Lücken haben ähnlich hohe Anteile (Abbildung 12). Eine hohe Aufwuchs-Stammzahl hängt allerdings mit einer hohen Aufwuchs-Stammzahl in der Vorverjüngung zusammen (Abbildung 15). Auch bei Weglassen eines Ausreissers bleibt der Zusammenhang, wenn auch schwächer, bestehen ($r^2 = 0,39$).

Stammzahl der Fichtenverjüngung umso grösser, je älter eine Lücke ist

Die Stammzahl der Fichtenverjüngung nimmt mit zunehmender Dauer seit dem Eingriff zu (Abbildung 13), ähnlich in Lücken wie in deren Randbereichen, und etwas deutlicher im Anwuchs als im Aufwuchs. Damit wird Hypothese 2 insgesamt bestätigt. Vor allem in 14-20 Jahre alten Lücken ist der An- und Aufwuchs oft sehr spärlich vertreten. Wir interpretieren dies nicht als eine Baisse der Verjüngungsstammzahl in diesem Zeitraum nach dem Eingriff, sondern als Ausdruck davon, dass die Verjüngung in einigen Lücken aus nicht an die Entwicklungsdauer gebundenen Gründen spärlich ist.

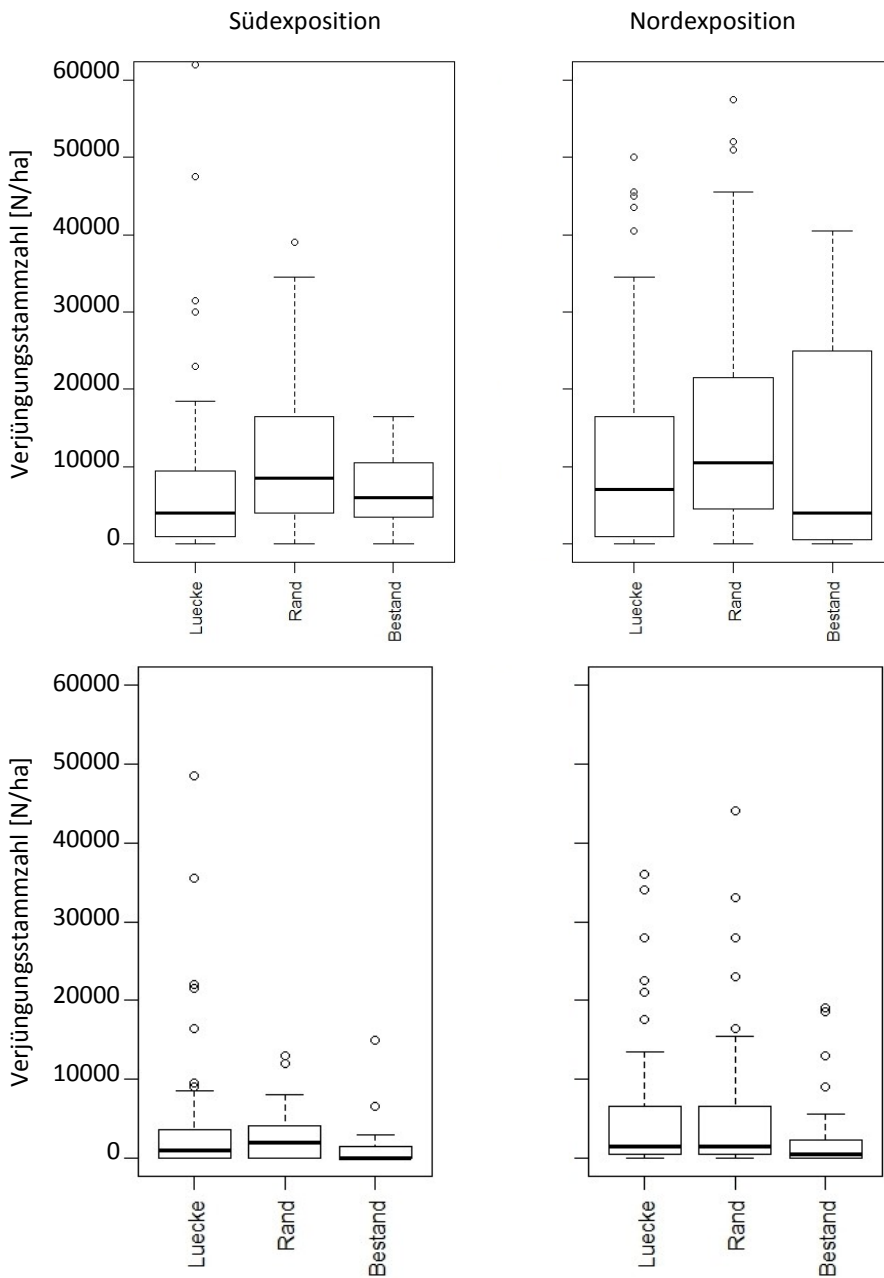


Abbildung 11. Boxplots der Stammzahl der Fichtenverjüngung für Südhang (links) und Nordhang (rechts) nach Position. Oben: Bäumchen aller Grössenkategorien, unten nur Fichten der Nachverjüngung mit Höhe ≥ 10 cm (entsprechend den statistischen Modellen, Tabelle 5). In den oberen 2 Abbildungen sind je vier Ausreisser pro Hangexposition mit Werten $> 60'000$ /ha nicht dargestellt.

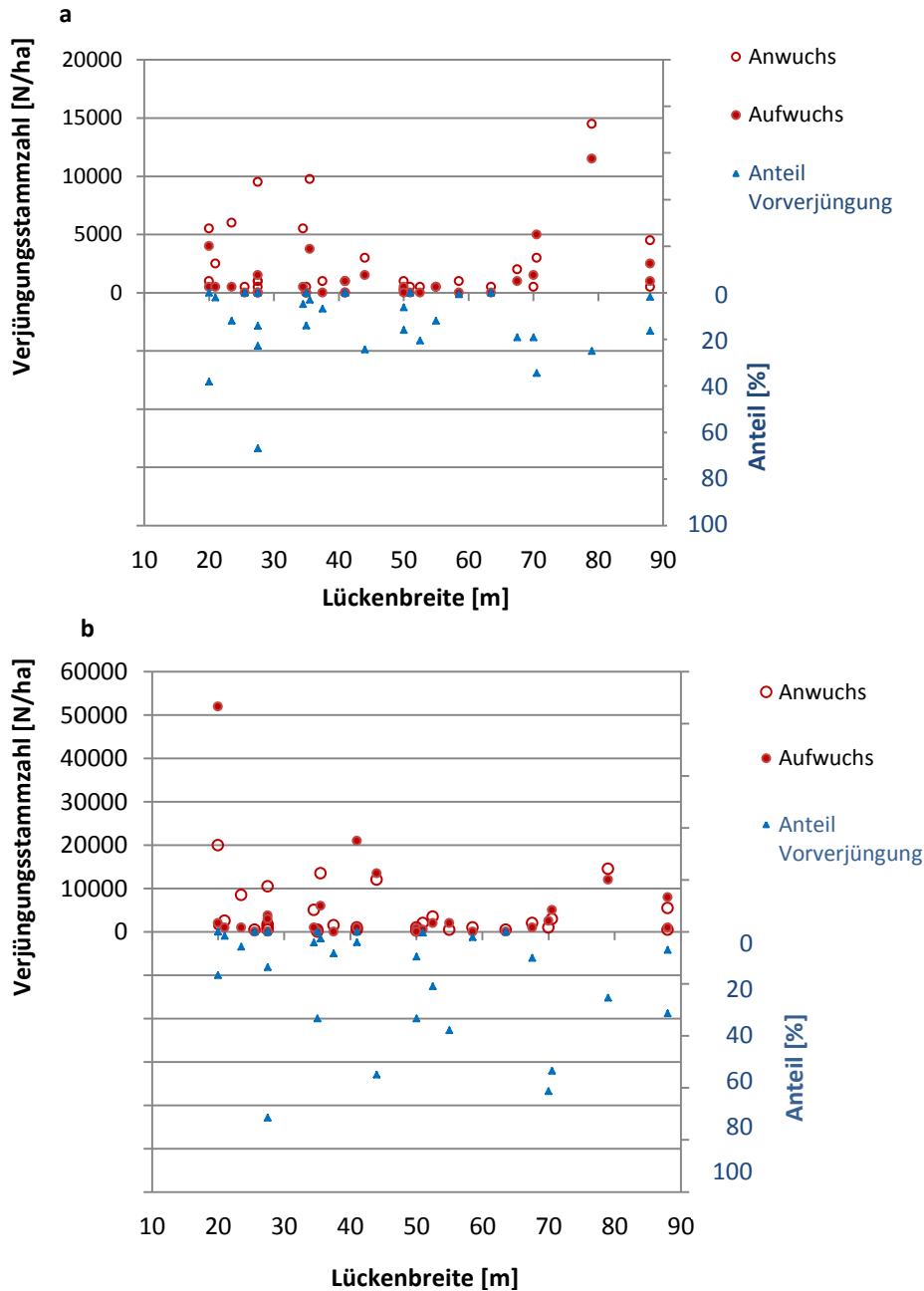


Abbildung 12. Zusammenhang zwischen Lückenbreite und (a) Stammzahl der Fichten in der Lücke und (b) aller Verjüngungspflanzen in der Lücke, jeweils im Anwuchs (rot, leere Kreise) und Aufwuchs (rot, gefüllte Kreise). Dargestellt ist für jede Fläche der Median aus 4-5 Werten. Der Anteil von Vorverjüngung (blaue Dreiecke) an der Gesamtverjüngung (Sämlinge, Anwuchs, Aufwuchs und Pflanzen ≥ 130 cm) ist unterhalb der horizontalen Achse dargestellt.

Maximale Stammzahl der Fichtenverjüngung zwischen 1400 und 1600 m ü.M.

Die Höhenlage der Lücken und die Stammzahl der Fichten hängen nicht linear zusammen (Abbildung 14): Das Stammzahlmaximum liegt bei etwa 1400 bis 1600 m ü.M., darunter und darüber ist die Anwuchs-Stammzahl geringer. Unser Studiendesign ist nicht geeignet, um die Gründe dafür zu untersuchen. Tendenziell ähnliche Muster wurden in Verjüngungsschlitzten der Surselva gefunden: In der obersubalpinen Stufe (>1730 m ü.M.) war die Stammzahl der Fichtenverjüngung nur etwa halb so gross wie hochmontan und subalpin (Gmür 2011).

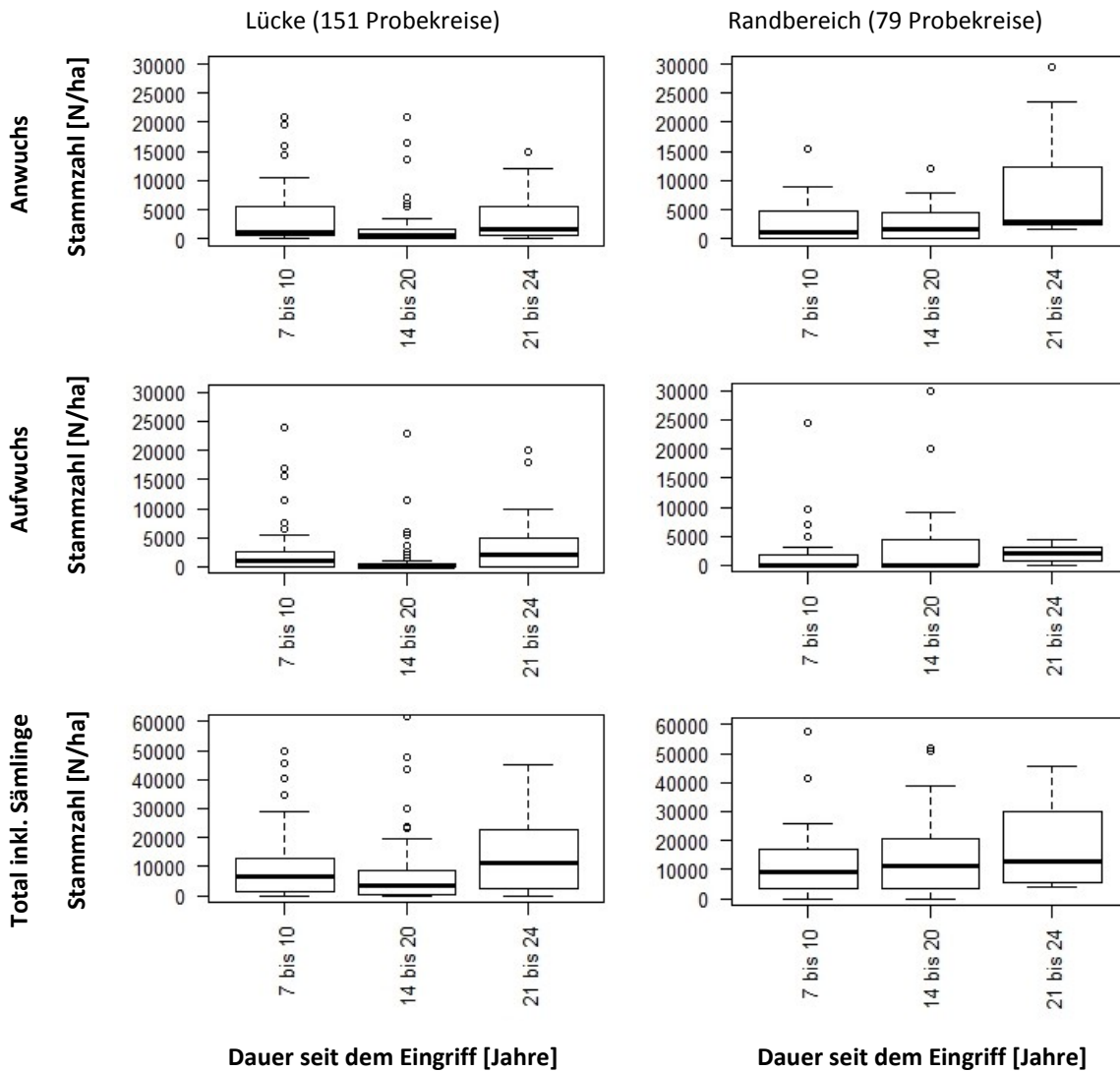


Abbildung 13. Zusammenhang zwischen Dauer seit dem Eingriff (in Klassen) und Stammzahl der Fichten für Anwuchs, Aufwuchs und total, für Lücke (links) und Randbereich (rechts). Dargestellt sind die Werte einzelner Probekreise (N=230). In der Klasse 7-10 Jahre sind 13 Flächen, in der Klasse 14-20 Jahre 12 Flächen und in der Klasse 21-24 Jahre 5 Flächen.

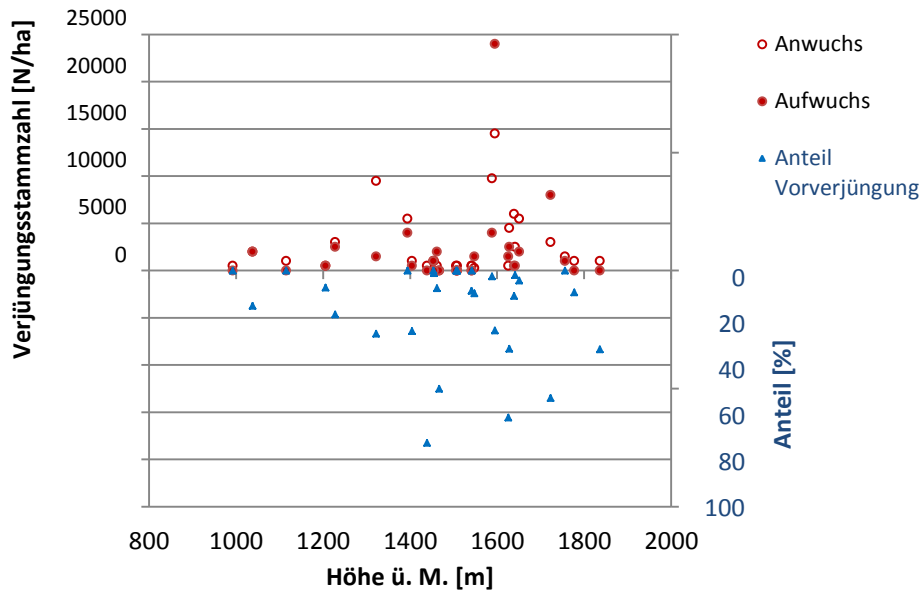


Abbildung 14. Zusammenhang zwischen Höhe ü.M. und Fichten-Stammzahl in der Lücke im Anwuchs (rot, leere Kreise) und Aufwuchs (rot, gefüllte Kreise). Dargestellt ist für jede Fläche der Median aus 4-5 Werten. Der Anteil von Vorverjüngung (blaue Dreiecke) an der Gesamtverjüngung der Fichte (Sämlinge, Anwuchs, Aufwuchs und Pflanzen ≥ 130 cm) ist unterhalb der horizontalen Achse dargestellt.

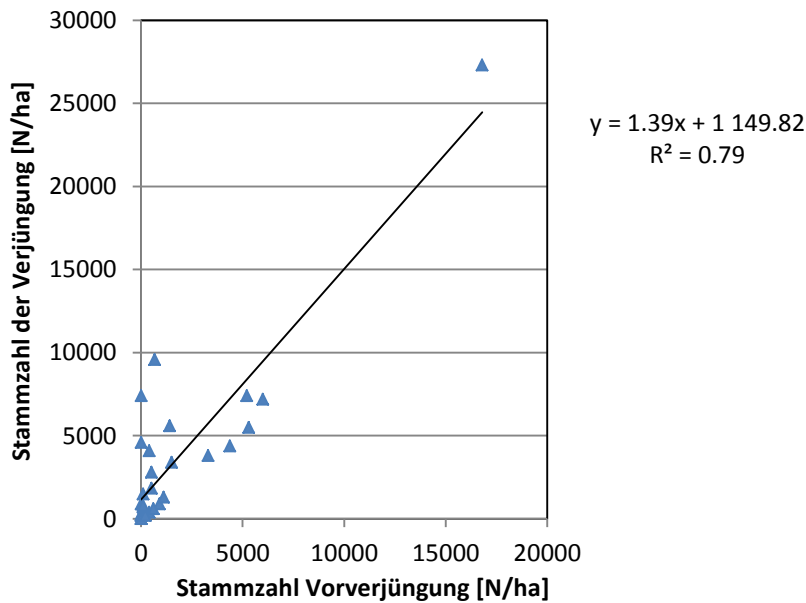


Abbildung 15. Zusammenhang zwischen Stammzahl der Fichtenverjüngung im Aufwuchs (40-129 cm) und Nachwuchs (>130 cm) und der Fichtenvorverjüngung im Aufwuchs und Nachwuchs (Mittelwerte pro Lücke). Bei Weglassen des Ausreissers rechts oben im Diagramm sinkt das R^2 auf 0,35.

Statistische Modellierung der Stammzahl der Fichten-nachverjüngung

Von der statistischen Modellierung präsentieren wir hier die Modelle der Stammzahl der Fichten für Nachverjüngung mit Höhe ≥ 10 cm. Diese Selektion der Verjüngungspflanzen schliesst den variablen Einfluss der Vorverjüngung aus, und auch die starken zeitlichen Schwankungen der Stammzahl der Sämlinge (< 10 cm). Modelle für Sämlinge sind im Anhang dargestellt (Tabellen 8-10). Wie Tabelle 3 zeigt, blieb damit ein Grossteil der Verjüngungspflanzen bei der Modellierung unberücksichtigt. Die Modellierung erfolgte nach Hangexpositionen getrennt. Es ergaben sich folgende Zusammenhänge (Tabelle 5, mittlere Spalten):

- Zwischen Lücke, Randbereich und Bestand ergaben sich keine Unterschiede; die in Abbildung 11 (untere Grafiken) sichtbaren Unterschiede sind also nicht signifikant.

- In breiteren Lücken war die Stammzahl in beiden Expositionen zwar insgesamt höher als in schmaleren (vgl. Abbildung 12). Allerdings darf dies nur in Wechselwirkung mit dem Standorttyp betrachtet werden, denn auf mittleren Standorten (nur in Nordexposition) und auf trockenen Standorten (beide Expositionen) war die Stammzahl in breiten Lücken vermindert.
- In Südexposition nahm die Stammzahl mit zunehmender Dauer seit dem Eingriff zu.
- In beiden Expositionen waren weder der lineare noch der quadratische Zusammenhang zwischen Höhenlage und Verjüngungsstammzahl signifikant (Abbildung 14), womit Hypothese 4 verworfen wird.
- In Südexposition war die Stammzahl bei Lückenausrichtung nach Süden in der Lücke und am Rand gegenüber dem Bestand vermindert; sie war hingegen bei Lückenausrichtung nach Westen in der Lücke und am Rand gegenüber dem Bestand erhöht.
- Auf den ersten Blick war die Verjüngungsstammzahl der Fichte auf wasserlimitierten Standorten in beiden Hangexpositionen höher. Die Stammzahl hing aber von der Standortgruppe in Wechselwirkung mit der Lückenbreite ab: Im Vergleich zu feuchten Standorten war sie in Südexposition auf trockeneren Standorten und in Nordexposition auf mittleren und trockenen Standorten in schmaleren Lücken grösser als in breiteren Lücken. Damit ist Hypothese 5 (weniger Fichtenverjüngung auf wasserlimitierten Standorte) in schmaleren Lücken verworfen, in breiteren dagegen bestätigt.

Insgesamt waren die statistischen Modelle für die Stammzahl der Fichten-Nachverjüngung wenig robust. Sie ergaben nur einen gewissen Einfluss der Bewirtschaftung (deutlicher Effekt der Dauer seit dem Eingriff in Südexposition, Lückenbreiteneffekt in beiden Expositionen, aber von der Standortgruppe abhängig) und einige Standorteffekte. Kleinstandorteffekte sind mit den Stammzahlmodellen nicht abbildbar (vgl. Modelle zur Fichtenpräsenz).

Tabelle 3. Stammzahl der Fichten-Jungpflanzen nach Hangexposition und Position (Lücke, Randbereich, Bestand) sowie Verjüngungszeitpunkt und Pflanzenhöhe. Angegeben sind Mittelwerte ± Standardfehler und in Klammern die Mediane. Die statistische Modellierung erfolgte für die grau hinterlegten Werte.

	Südexposition			Nordexposition		
	Gesamtverjüngung (Vor- und Nachverjüngung, alle Grössen)	Nachverjüngung		Gesamtverjüngung (Vor- und Nachverjüngung, alle Grössen)	Nachverjüngung	
		Alle Grössen	≥ 10 cm		Alle Grössen	≥ 10 cm
Lücke	10'552 ± 2'529 (4'000)	9'789 ± 2'539 (2'500)	4'342 ± 1'208 (1'000)	12'771 ± 2'143 (7'000)	9'515 ± 1'869 (4'250)	4'484 ± 715 (1'500)
Rand	13'396 ± 3'052 (8'500)	10'465 ± 3'069 (3'500)	2'844 ± 680 (2'000)	16'050 ± 2'373 (10'500)	14'140 ± 2'184 (9'000)	5'980 ± 1'351 (1'500)
Bestand	7'115 ± 1'430 (6'000)	6'038 ± 1'472 (6'000)	2'000 ± 1'204 (0)	13'389 ± 3'397 (4'000)	12'092 ± 3'283 (2'500)	3'037 ± 1'044 (500)
total	10'934 ± 1'719 (5'000)	9'494 ± 1'722 (3'500)	3'595 ± 742 (1'000)	13'827 ± 1'411 (8'000)	11'274 ± 1'318 (5'500)	4'692 ± 583 (1'500)

Eine zusammenfassende Interpretation der Befunde zur Stammzahl der Fichten-Nachverjüngung ergibt, dass die waldbauliche Behandlung (Lückenbreite, Position im Verhältnis zur Lücke, verbleibende Überschildung und Dauer seit dem Eingriff) die Stammzahl nicht stark beeinflusst. Standortfaktoren, hier repräsentiert durch Höhenlage und Standortgruppe, sind mindestens so wichtig. In den untersuchten 30 Verjüngungslücken kamen zwischen 50 und 70 m Lückenbreite nur geringe Stammzahlen im Fichtenan- und -aufwuchs vor. In schmaleren Lücken war die Verjüngung teilweise dichter, für breitere war die Stichprobe zwar sehr klein, aber es scheint bei dichter Vorverjüngung durchaus möglich, insgesamt grosse Verjüngungsstammzahlen auf der Kahlfäche zu erreichen.

Geringer Einfluss der Lückenbreite auf die Verjüngungsstammzahl

Fichtenverjüngung in Lücken, Randbereich und Bestand ähnlich häufig

Es überrascht, dass die Verjüngungs-Stammzahl für Bäumchen mit Höhe ≥ 10 cm in Lücken, Randbereich und Bestand ähnlich war. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Sämlinge (Höhe < 10 cm) in beiden Expositionen im Randbereich tendenziell häufiger waren als in den Lücken, sowohl was den Mittelwert als auch was den Median betrifft (Tabelle 4). Es ist also zu erwarten, dass sich im Laufe der Zeit Stammzahlunterschiede zwischen Lücken und den Randbereichen auch im Aufwuchs zeigen werden. Bemerkenswert sind die Effekte der Lückenausrichtung an Südhängen auf Auf- und Nachwuchs. Sie treten zwar nur in Interaktion mit der Position auf, zeigen aber doch, dass die Lückenausrichtung – ziemlich sicher über die Wasserversorgung – die Verjüngungs-Stammzahl beeinflusst.

Tabelle 4. Stammzahl der Fichtensämlinge (< 10 cm, Vor- und Nachverjüngung zusammen) nach Hangexposition und Position (Lücke, Randbereich, Bestand). Angaben in N/ha. Angegeben sind Mittelwerte \pm Standardfehler und in Klammern die Mediane. Die statistische Modellierung erfolgte für die grau hinterlegten Werte.

	Südexposition	Nordexposition	Total
Lücke	5'342 \pm 1'861 (500)	4'989 \pm 1'564 (500)	5'122 \pm 1'197 (500)
Rand	7'620 \pm 3'035 (1'000)	7'770 \pm 1'538 (3'000)	7'715 \pm 1'468 (2'000)
Bestand	4'077 \pm 1'293 (1'500)	9'055 \pm 2'516 (1'500)	7'438 \pm 1'776 (1'500)
total	5'843 \pm 1'397 (1'000)	6'444 \pm 1'050 (1'500)	6'224 \pm 838 (1'000)

4.3.2 Ergebnisse und Interpretation zur Präsenz

Zur Untersuchung des Deckungsgrades (der Präsenz) ergänzen wir den Datensatz der 1448 Transektpunkte (auf denen nur Fichten vorkamen) mit Verjüngungspflanzen, die mit Zufallsauswahl in Nähe der Verjüngungspunkte erfasst wurden. Im Unterschied zur Analyse der Stammzahl und Baumhöhe werden hier auch vorverjüngte Pflanzen berücksichtigt, aber keine Sämlinge (< 10 cm).

Starke Kleinstandortseffekte auf die Präsenz von Fichtenan- und -aufwuchs

Ob eine Fichte vorkommt oder nicht, wird unabhängig von der Hangexposition hauptsächlich von Kleinstandortsfaktoren wie Mikrorelief und Deckungstyp ab (Tabelle 5). Beim Mikrorelief begünstigen schon kleine Geländeerhebungen um 10 cm oder mehr die Verjüngungsgunst stark, während Vertiefungen um 10 cm oder mehr sie stark vermindern. Beim Deckungstyp sind die Effekte je nach Hangexposition unterschiedlich. In Südexposition waren Felsen und als hemmend eingestufte Begleitvegetation sowie Streuaufgaben ungünstig; in Nordexposition waren Felsen, als fördernd eingestufte Begleitvegetation, Krautvegetation und Streuaufgaben hingegen verjüngungsgünstig. Die gegenläufigen Effekte bei Felsen und Streuaufgaben belegen, dass an Südhängen die Wasserversorgung für die Fichtenverjüngung limitierend ist, an Nordhängen hingegen kaum. Diese Befunde bestätigen Hypothese 6, die eine Abhängigkeit der Fichtenverjüngung von bestimmten Deckungstypen postuliert. Insgesamt sind diese Ergebnisse sehr ähnlich wie für Sämlinge in Fichtenwäldern der Surselva (Brang 1996).

An Lücken auf Südhängen waren Fichten in der Lücke tendenziell, im Randbereich der Lücken signifikant weniger anzutreffen als im Bestand; an Nordhängen bestand hier kein Zusammenhang. Auf trockenen Waldstandorten waren Fichten – nur an Südhängen – weniger präsent als auf mittleren oder feuchten. Wiederum nur an Südhängen waren Fichten weniger anzutreffen, wenn die Lücke nach Süden (nur Tendenz) oder nach Westen ausgerichtet war. An Südhängen bestanden weitere Interaktionen zwischen Lückenausrichtung und Position, die aber ökologisch schwierig zu interpretieren sind. An Nordhängen deuten zwei Effekte darauf hin, dass eine Überschirmung durch Fichten die Präsenz der Verjüngung vermindert (Hypothese 7): Eine höhere Grundfläche im angrenzenden Bestand beeinflusste die Fichtenpräsenz negativ, während das Fehlen einer Überschirmung im Bestandesinneren sie begünstigte.

An Nordhängen war die Fichtenpräsenz umso höher, je breiter die Lücken waren. Dieses statistisch signifikante Resultat ist auf drei Lücken mit Breiten von 70 m und mehr zurückzuführen (Abbildung 12; Lücken Bergün1, Conters, Olivone). In diesen Lücken fällt eine hohe Präsenz von Sauergräsern und in einer Lücke zusätzlich von Moosen auf.

Tabelle 5. Zusammenfassende Ergebnisse der statistischen Modellierung der Präsenz, Stammzahl und Höhe der Fichten-Jungpflanzen. Bei Stammzahl und Höhe sind nur nachverjüngte Fichten berücksichtigt. Sterne bezeichnen das Signifikanzniveau: (*) p 0,10-0,05, * p 0,05-0,01, ** p = 0,01-0,001, *** p < 0,001, Pfeile positive (↑) bzw. negative (↓) Effekte. n.s. = nicht signifikant, n.d. = nicht definiert. Die statistischen Modelle sind in den angegebenen Tabellen im Anhang (Kap. 11) beschrieben.

Zielgrösse		Präsenz ⁰⁾		Stammzahl		Pflanzenhöhe	
Hangexposition		Süd	Nord	Süd	Nord	Süd	Nord
Tabellen-Nummer im Anhang (Kap. 11.3)		Tabelle 11	Tabelle 12	Tabelle 13	Tabelle 14	Tabelle 18	Tabelle 19
Anzahl Beobachtungen (eliminierte Ausreisser) t=Transektpunkte, p = Probekreise, e = Einzelpflanzen		655t (6)	1176t (14)	96p (3)	168p (3)	700e (8)	1568e (18)
Management	Position ¹⁾						
	Lücke	↓(*)↓ **	n.s.	↑(*)	n.s.	↑*	n.s.
	Rand		n.s.	↑(*)	n.s.	n.s.	n.s.
	Jahre seit Eingriff	n.s.	n.s.	↑***	n.s.	↑**	↓**
	Lückebreite	n.s.	↑***	↑***	↑**	n.s.	↑***
	Verbissform stark					n.s.	↓***
	Lückenausrichtung ²⁾						
Nord	n.d.	n.s.	n.d.	n.s.	n.d.	n.s.	
Süd	↓(*)	n.d.	n.s.	n.d.	n.s.		
West	↓***	n.s.	↓***	↓(*)			
Standort	Grundfläche der Fichte im Bestand	n.s.	↓*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Standortgruppe ³⁾						
	mittel	n.s.	n.s.	n.s.	↑**	n.s.	↑***
	trocken	↓*	n.s.	↑**	↑*	n.s.	↓***
	Höhe ü. M. linear	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	↑**
	Höhe ü. M. quadratisch	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	↓*
	Präsenz Vogelbeere nein				n.s.	↑***	n.s.
Präsenz Weide nein				n.s.	n.s.	↓***	
Kleinstandort	Konkurrenzvegetation/Deckungstyp ⁴⁾						
	Felsen	↓***	↑*				
	fördernd	n.s.	↑***				
	hemmend	↓**	n.s.				
	Kraut	n.s.	↑*				
	organisch	↓*	n.s.				
	Streu	n.s.	↑*				
Mikrorelief ⁵⁾							
eben	↓***	↓***					
tief	↓***	↓***					
Stockdistanz ⁶⁾	n.s.	n.s.					
Schirm ⁷⁾	n.s.	n.s.			↓***	↑(*)	
Interaktionen	Position Lücke*Jahre seit Eingriff ⁸⁾	n.s.				↓*	↑***
	Position Rand*Jahre seit Eingriff ⁸⁾	n.s.				n.s.	↑***
	Position Bestand*ohne Schirm ⁹⁾	n.s.	↑**			n.s.	n.s.
	Lückebreite*Standorttyp mittel ¹⁰⁾	n.s.	n.s.	n.s.	↓**	ent-	ent-
	Lückebreite*Standorttyp trocken	n.s.	n.s.	↓**	↓*	fernt ¹⁴⁾	fernt ¹⁴⁾
	Position Lücke*Lückenausrichtung Süd ¹¹⁾	n.s.	n.s.	↓***			n.d.
	Position Rand*Lückenausrichtung Süd ¹¹⁾	n.s.	n.s.	↓**			n.d.
	Position Lücke*Lückenausrichtung West ¹²⁾	↑**	n.s.	↑***			n.s.
	Position Rand*Lückenausrichtung West ¹²⁾	↑**	n.s.	↑***			n.s.
Position Lücke*Lückenausrichtung Nord ¹³⁾						↑*	

0) vom Datensatz der Transektpunkte (N=1448) + Zusatzpflanzen (N=661) (Σ=2059) wurden Transektpunkte mit Präsenz anderer Baumarten entfernt (N=208), um das Modell nicht zu beeinflussen (z.B. wenn wir diese Werte mit „0“ ersetzt hätten)

1) Im Vergleich zur Position „Bestand“

2) Im Vergleich zur Lückenausrichtung „Ost“

3) Im Vergleich zur Standortgruppe „feucht“

4) Im Vergleich zu „andere“

5) Im Vergleich zu „erhöht“

6) Im Vergleich zu „gross“

7) Im Vergleich mit „mit Schirm“

8) Im Vergleich zu „Position Bestand*Jahre seit Eingriff“

9) Im Vergleich zu „Bestand unter Schirm“

10) Im Vergleich zu „Lückebreite und Standortgruppe feucht“

11) Im Vergleich zu „Position Bestand*Lückenausrichtung Süd“

12) Im Vergleich zu „Position Bestand*Lückenausrichtung West“

13) Im Vergl. zu „Position Bestand*Lückenausrichtung Nord“

14) Interaktion signifikant, aber wegen unbalancierten Designs entfernt (Anhang, Tabellen 18 und 19)

4.3.3 Ergebnisse und Interpretation zur Baumhöhe

Bei der Untersuchung des Einflusses der Verjüngungslücken auf die Baumhöhe fokussieren wir auf Fichten der Nachverjüngung. Vorverjüngung schlossen wir aus, da sie oft wesentlich grösser ist und die mittlere Höhe der Verjüngungspflanzen stark beeinflussen kann. Ebenso schlossen wir weniger als 10 cm grosse Fichtenpflanzen aus, welche stellenweise in grosser Zahl auftreten und den Höhen-Mittelwert stark vermindern können.

Insgesamt nahm die Grösse der Fichtenjungpflanzen der Nachverjüngung mit zunehmender Dauer seit dem Eingriff leicht zu (Abbildung 16). Pro Jahr nach dem Eingriff betrug die Zunahme der mittleren Pflanzhöhe insgesamt 2,4 cm; in Lücken 2,1 cm, im Randbereich 2,8 cm; in Südexposition 2,9 cm, in Nordexposition 1,6 cm. Wegen Mortalität und Einwuchs von Fichtenjungpflanzen darf diese Zunahme nicht als mittlerer Höhenzuwachs von Einzelpflanzen interpretiert werden.

Fichten-Jungpflanzen
in Lücken und im
Randbereich in
Nordexposition
grösser als im Be-
stand

8-24 Jahre nach Schlagen der Lücken waren die Fichten nur in Nordexposition in den Lücken bzw. im Randbereich mit Medianwerten von je 23 cm deutlich grösser als im angrenzenden Bestand (Median 14 cm). In Südexposition hatten Fichten-Jungpflanzen eine Höhe (Median) von 23 cm in der Lücke, 25 cm im Randbereich und 28 cm im Bestand, wobei in den Lücken die Höhen am stärksten streuten und am meisten grössere Pflanzen vorkamen (Abbildung 17). Der Grund für die geringen Höhenunterschiede liegt darin, dass die vielen kleinen Pflanzen zu kleinen Medianwerten führen.

Die Baumhöhen der Fichten-Jungpflanzen wurden für süd- und nordexponierte Hänge separat statistisch modelliert. Da das beste Modell für südexponierte Hänge nur 19% der Streuung erklärte und als wenig zuverlässig gelten muss, wird nicht näher darauf eingegangen. An nordexponierten Hängen erklärte das beste Modell 44% der Streuung. Die Pflanzen waren hier grösser in der Lücke (gegenüber dem Randbereich, gegenüber dem Bestand hingegen nicht signifikant), bei längerer Dauer seit dem Eingriff (in Lücke und im Randbereich, nicht aber im Bestand), ohne Überschildung, in grösseren Lücken, bei weniger Verbiss⁴, bei Lückenausrichtung nach Norden oder Westen, auf mittleren Standorten (gegenüber solchen mit Hochstauden oder trockenen Standorten) sowie bei Präsenz von Weiden (Tabelle 19 im Anhang).

4.3.4 Vergleich der Verjüngungskennzahlen mit Sollwerten

Grenzen von
Deckungsgrad-
Sollwerten

Unter dem Deckungsgrad der Verjüngung wird der Anteil der bedeckten Bodenfläche verstanden, wobei mehrfache Überdeckung nur einmal gezählt wird. Für Deckungsgrade der Verjüngung liegen die Sollwerte für Aufwuchs- und Nachwuchspflanzen (40 cm Höhe bis 12 cm BHD) zwischen 3 und 5% der Bestandesfläche (Frehner et al. 2005). Sie gelten für strukturierte Bestände. Der Vorteil von Deckungsgraden ist, dass sie rasch geschätzt werden können, und dass dies im Bereich hoher Deckung auch zu robusten Schätzwerten führt. Problematisch an Deckungsgrad-Sollwerten ist, 1) dass es für Deckungsgrade keine wissenschaftlich dokumentierten Langzeit-Entwicklungen gibt, 2) dass die Schätzfehler bei Deckungsgraden relativ hoch sind (schlechte Reproduzierbarkeit, besonders bei tiefen Deckungsgraden im Bereich der Sollwerte) und 3) dass es keine solchen Sollwerte für Kahlfächen (also die in dieser Studie untersuchte Situation) gibt.

Für eine Bestandeslücke ohne Vorverjüngung (Deckungsgrad = 0%) nehmen wir folgende Entwicklung der Verjüngung an: Es samen sich zunächst immer mehr Sämlinge an, was deren Deckungsgrad erhöht; zudem erhöht auch das Wachstum der Sämlinge den Deckungsgrad; die konkurrenzbedingte Mortalität senkt den Deckungsgrad hingegen nur marginal, weil Mortalität bei mehrfacher Deckung vermehrt auftritt. Die maximale Deckung erreicht theoretisch 100%, dürfte aber wegen unregelmässiger Verteilung der Verjüngungspflanzen v.a. in Gebirgswäldern oft darunter liegen. Die grossen Bandbreiten von Deckungsgrad-Sollwerten, welche bei unterschiedlichen Annahmen über die Einflussfaktoren resultieren, zeigen die Unsicherheit gut auf (Brang & Duc 2002).

⁴ Es ist zu berücksichtigen, dass in dieser Studie nicht die Verbissintensität, sondern nur das Vorhandensein sehr starken Verbisses erfasst wurde (Abbildung 32).

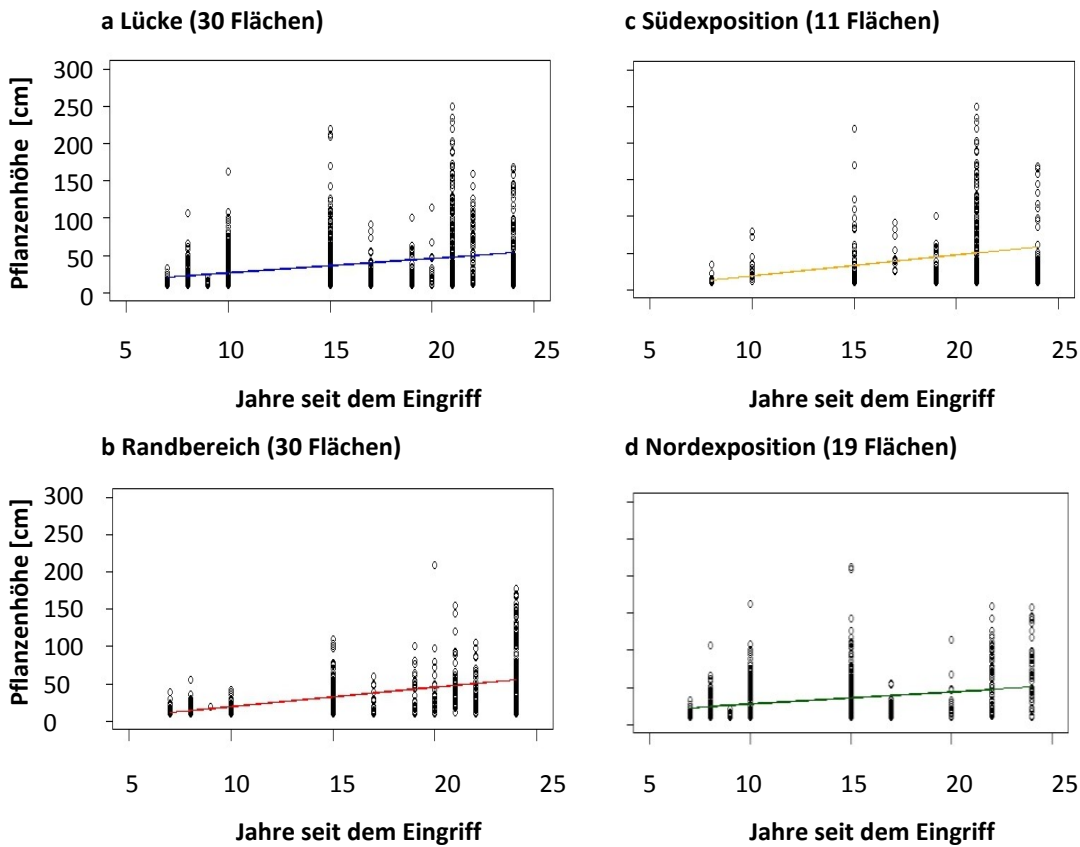


Abbildung 16. Höhe der Fichten-Nachverjüngung in 30 Flächen in unterschiedlicher Position (a Lücke, b Randbereich) bzw. bei unterschiedlicher Hangexposition (c Südexposition, d Nordexposition).

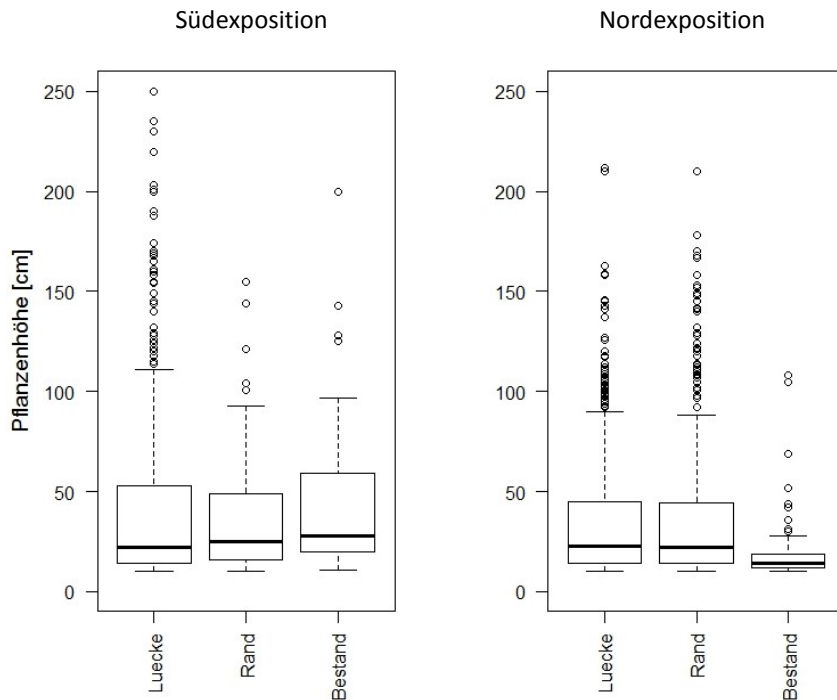


Abbildung 17. Höhe der Fichten-Nachverjüngung (nur Pflanzen ≥ 10 cm) nach Hangexposition in unterschiedlicher Position.

Deckungsgrad und Stammzahl der Verjüngung hängen nur schwach zusammen

Ein Vergleich von Deckungsgrad- und Stammzahl-Werten mit Daten aus dieser Studie und einer slowenischen Arbeit ergab, dass diese beiden Verjüngungskenngrössen nur sehr schwach korrelieren (Details im Anhang, Kap.). Den Deckungsgrad als Kennzahl beurteilt Schodterer kritisch (2001, S. 13): *«Von einem Mindestdeckungsgrad auszugehen, ist bei kleinen Pflanzen und geringen Stammzahlen sehr problematisch. Eine „geschlossene“ Fichtenkultur mit ca. 30 cm Pflanzenhöhe und 2500 Pflanzen je Hektar überschirmt nur 1% der Fläche, wenn jede Pflanze 400 cm² überschirmt. Von kleineren Pflanzen mit 25-100 cm² „Schirmfläche“ werden schon 10000-40000 je Hektar benötigt, um 1% der Fläche zu decken. Für geringe Pflanzenzahlen müsste man also in der Lage sein, den Deckungsgrad im Promillebereich und darunter objektiv und nachvollziehbar zu schätzen, womit diese Methode für die Österreichische Waldinventur ausscheidet.»*

Deckungsgrad der Verjüngung in den Lücken vermutlich noch unbefriedigend

Wir erachten es daher als schwierig, bei den hier untersuchten grossen Verjüngungslücken aufgrund des Deckungsgrades zu beurteilen, ob die Verjüngung genügend bzw. in welchem Ausmass sie allenfalls verzögert ist. Wir vermuten, dass die mittlere Deckung von rund 12% (Fichte: 5,6%, Tabelle 1) im jetzigen Jungwuchsstadium für eine einigermaßen geschlossene Bestockung im Stangenholzstadium nicht ausreicht, v.a. weil die mittlerweile dichte Vegetation die weitere Ansamung stark behindert. Auch in Verjüngungsschlitten in der Surselva ging der Einwuchs 10 Jahre nach dem Eingriff bereits wieder zurück (Hirsiger et al. 2013). Aufgrund der in den grossen Lücken bestätigten starken Kleinstandortsabhängigkeit der Verjüngung scheint es uns plausibel anzunehmen, dass die günstigen Kleinstandorte bereits weitgehend besetzt sind und die ungünstigen sich nur zögerlich verjüngen oder sogar Jahrzehnte unbesetzt bleiben werden. Ob diese Annahmen zutreffen, wäre aber durch weitere Forschung zu prüfen.

Stammzahl-Sollwerte der Verjüngung

Stammzahl-Sollwerte haben diesbezüglich weniger Schwächen. Für Pflanzungen sind sie etabliert, für Naturverjüngungen müssen sie aufgrund von empirischen Belegen zur demographischen Entwicklung von Jungwäldern oder Verjüngungsgruppen in strukturierten Beständen festgelegt werden. Stammzahl-Sollwerte werden zuweilen verworfen, weil bei ihrer Anwendung Extremwerte (sehr hohe Verjüngungs-Stammzahlen) stark ins Gewicht fallen können. Dies ist aber nur der Fall, wenn Mittelwerte verwendet werden. Bei Verwendung des robusten Medians entfällt dieser Nachteil.

Bisher verwendete Sollwerte zwischen 1500 und 3000 Verjüngungspflanzen pro ha

Für Schweizer Plenterwälder in verschiedenen Höhenlagen hat Bachofen (2009) Grundlagen geschaffen. Die von ihm dargestellten Jungwald-Stammzahlen liegen im Bereich von 0 bis 130 cm Höhe in Gebirgswäldern bei etwa 1600/ha (Abb. 5 bei Bachofen 2009, Grössenklassen aufsummiert). Duc & Brang (2003) haben aus gemessenen BHD-Verteilungen Sollwerte für Nachwuchspflanzen mit 0,1-11,9 cm BHD für Plenterwälder im Gleichgewicht abgeleitet (Tabelle 6). Bühler (2005) hat gutachtlich Sollwerte für 10 bis 130 cm hohe Jungbäume auf «in Verjüngung stehenden Flächen» festgelegt (Tabelle 6). Sie liegen in hochmontanen Fichten-Tannenwäldern und in subalpinen Fichtenwäldern meist bei 2000/ha, in einzelnen Standorttypen auch bei 2500/ha oder 3000/ha. Diese gutachtlich festgelegten Sollwerte liegen für Fichten- und Fichten-Tannenwälder bei etwa zwei Dritteln der Werte von Duc & Brang (2003). Da die Sollwerte nach Duc & Brang für Plenterwälder im Plentergleichgewicht gelten, müssten sie für Kahlfächen erhöht werden, womit sie noch stärker von den vergleichsweise tiefen Sollwerten von Bühler (2005) abweichen würden. Ein direkter Vergleich mit Sollwerten für gepflanzte Jungwälder scheint zwar nicht möglich, weil dort i.d.R. eine regelmässige räumliche Verteilung angenommen wird; Pflanzzahlen von z.B. 2500/ha (entsprechend einem Quadratverband von 2 m) sind aber den Sollwerten für Naturverjüngungen recht ähnlich.

Schodterer (2000, 2001) entwickelt Stammzahl-Sollwerte pro Zielbaumart für verschiedene Waldtypen in Österreich, für Pflanzen ab 10 cm Grösse. Er geht von einem Sollwerte aller Baumarten von 2500/ha aus und von Bestockungszielen (Zehnteln) für 10 Waldtypen (Schodterer 2001, S. 56). Daraus werden Mindestpflanzenanzahlen pro Waldtyp abgeleitet (2001, S. 61, Tab. 9), die zwischen 1500 und 2500/ha liegen, für montane und subalpine Fichtenwälder aber bei 1500/ha. Eine ähnliche Lage des Sollwerts lässt sich aus Nüsslein et al. (1997) ableiten: In Hochlagen des Bayerischen Waldes (Fichtenwaldstandorte) wurden in von der Forsteinrichtung als «nicht flächig verjüngt» bezeichneten Totholzflächen und vom Borkenkäfer gefährdeten Fichtenbeständen im Mittel 563 Verjüngungspflanzen (20 cm) pro ha festgestellt, in «flächig verjüngten» Beständen hingegen 2043 pro ha. Nimmt man Pflanzen ab 10 cm Höhe hinzu, sind es in als «nicht flächig verjüngt» bezeichneten Totholzflächen 1441 Bäumchen pro ha, in gefährdeten Beständen 900 pro ha.

Ein Sollwert von 2000/ha kann auch im Vergleich zu einem Baumholz verifiziert werden. Hier ergeben sich Stammzahlen von etwa 250-500/ha (Ertragstafel Fi, EAFV, Bonität ca. 14-20). Wird ange-

nommen, dass von 2000 Pflanzen ca. 1000 in grosser Nähe anderer Pflanzen wachsen, dann bleibt für Mortalität vom Jungwuchs bis ins Baumholz noch eine Ausfall-Marge von 50-75% (1000-(250-500)/ha = 500-750/ha), wenn man weiteren Einwuchs (der rund 10 Jahre nach dem Schlag nur noch spärlich sein dürfte) vernachlässigt. Diese Marge scheint vernünftig.

Die oben genannten Sollwerte sind zwar nicht solide fundiert, aber stammen aus unterschiedlichen Quellen und sind insgesamt recht ähnlich. Es gibt keinen Anlass zur Annahme, dass Sollwerte für natürlich verjüngte Jungwälder in einem ganz anderen Bereich liegen sollten. Bei der praktischen Anwendung (s. unten) gibt es zudem viele Fälle, in denen die Stammzahlen wesentlich über oder unter dem Sollwert liegen, so dass sich die Einschätzung, ob die Verjüngung genügt oder nicht, zwar im Einzelfall ändern kann, bei Betrachtung vieler Fälle aber nicht erheblich ändert. Wir verwenden daher hier im Sinn einer Arbeitshypothese die Sollwerte von Bühler (2005).

Tabelle 6. Sollwerte für natürlich verjüngte Nachwuchspflanzen pro Waldtyp (DB = Duc & Brang 2003, Abb. 2; Bü = Bühler 2005, Tab. 2).

Waldtyp	Pflanzengrösse			Total	Quelle
	10-39 cm Höhe	40-129 cm Höhe	0,1-11,9 cm BHD		
Fichtenwälder	1'600	1'150	900	3'650	DB
	2'000 (10-129 cm)	-	-	-	Bü
Fichten-Tannenwälder	2'250	1'200	1'100	4'550	DB
	2'000 (10-129 cm)	-	-	-	Bü
Tannen-Buchenwälder	7'500	2'100	1'600	11'200	DB
	4'000 (10-129 cm)	-	-	-	Bü

Eine Anpassung der Sollwerte von Bühler schlagen wir hier aber vor. An ihnen ist unbefriedigend, dass sie für einen grossen Höhenbereich der Verjüngung gelten. Im Anwuchs dürfte die Mortalität noch relativ hoch sein, solche Pflanzen stellen somit eher ein Potenzial dar. Als «gesichert» kann Verjüngung erst in der Aufwuchsphase gelten. Unser Sollwert berücksichtigt daher jede Aufwuchspflanze, zählt aber nur jede zweite Aufwuchspflanze. Es wird also angenommen, dass von den Aufwuchspflanzen 50% das Aufwuchsstadium nicht erreichen. Pflanzen <10 cm (Sämlinge) werden vernachlässigt, weil deren Etablieren und Verschwinden sehr dynamisch verläuft (Hirsiger et al. 2013).

Getrennte Betrachtung von An- und Aufwuchs

Das Beurteilungsschema veranschaulicht das «Verjüngungsdiagramm» (Abbildung 18) mit folgendem Prüfverlauf:

Das Verjüngungsdiagramm: eine Weiterentwicklung von Stammzahl-Sollwerten

- Ist im Vergleich zum Aufwuchs-Sollwert genügend Aufwuchs vorhanden?
 - Wenn ja: Verjüngung erfolgreich (grüne Fläche).
 - Wenn nein: weiter zu Punkt 2.
- Ist so viel Anwuchs vorhanden, dass er den Mangel beim Aufwuchs kompensieren kann?
 - Wenn ja: Verjüngung wahrscheinlich (in einigen Jahren) erfolgreich (gelbe Fläche).
 - Wenn nein: Sollwert nicht erfüllt, weiter zu Punkt 3 (orange Fläche).

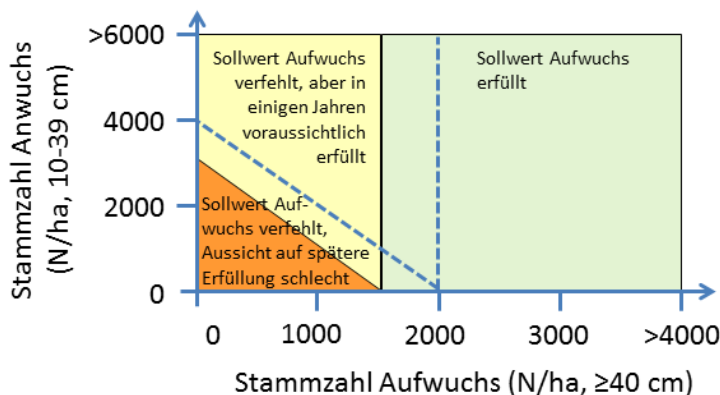


Abbildung 18. Verjüngungsdiagramm für Stammzahlen (Mediane) von Anwuchs und Aufwuchs. Im Bereich über 4000 Aufwuchsbäumchen bzw. über 6000 Anwuchsbäumchen pro ha setzen sich die grünen bzw. gelben Flächen fort. Gestrichelte Linie: Obere Grenze des orangen sowie Aufwuchs-Sollwert bei Verwendung des Mittelwerts anstelle des Medians.

Es stellt sich die Frage, wo die Begrenzungslinien der drei Flächen die Achsen schneiden. Vorgeschlagen werden folgende Median-Werte [N/ha] für Aufwuchs und Anwuchs, die noch gewisse Sicherheitsmargen beinhalten:

- Es wird der robuste Median der Stammzahl anstelle des Mittelwerts verwendet, was die obere Begrenzung der roten Fläche um 25% senkt. Dies ist im Anhang aus den Daten der Verjüngungsinventur abgeleitet (Kap. 11.3.3., Abbildung 36).
- 1500 (Aufwuchs)/0 (Anwuchs): Entspricht umgerechnet dem Sollwert von Bühler (2005), der für den Mittelwert 2000/ha vorschlug, allerdings für Anwuchs und Aufwuchs *zusammen*. Dass der Sollwert hier auf Aufwuchs angewendet wird, entspricht zwar einer kleinen Marge; diese Marge verschwindet allerdings wieder, weil Bühler seine Sollwerte auf in Verjüngung stehende Waldkomplexe bezog, hier aber Sollwerte auf Verjüngungsflächen angewendet werden.
- 0/3000: Es wird angenommen, dass 3000 Anwuchspflanzen innert 5-10 Jahren zu etwa 1500 Aufwuchspflanzen heranwachsen, während 1500 Anwuchspflanzen ausfallen.
- Verlauf zwischen 1500/0 und 0/3000: Es wird ein linearer Verlauf angenommen.

Um die Lage dieser Begrenzungslinien noch besser zu begründen, wäre weitere Forschung nötig. Es bräuchte besonders mehr Daten zur Mortalität von Verjüngungspflanzen. Ein erster Ansatz könnte die Auswertung vorhandener Verjüngungsdaten von Windwurfflächen sein.

Fichtenverjüngung nur in 12 von 30 grossen Lücken eindeutig gelungen, bei Einbezug anderer Baumarten in 17 von 30.

Wir wenden hier das Verjüngungsdiagramm einerseits nur auf Fichtenverjüngung, andererseits auf alle Verjüngungspflanzen an. Letztere Lösung liegt nahe bei derjenigen von Bühler (2005), dessen Sollwert sich auf die Hauptbaumarten pro Standorttyp bezieht. Im Verjüngungsdiagramm lassen sich verschiedene Fälle (und auch die 30 untersuchten Lücken) einzeichnen (Abbildung 19). Das Resultat für Fichtenverjüngung: In 12 Lücken ist die Verjüngung als gelungen anzusehen, in 16 als misslungen. In 2 Lücken könnte sie, wenn der vorhandene Anwuchs sich zu Aufwuchs entwickelt, in den nächsten Jahren noch gelingen. «Misslingen» heisst dabei, dass es noch lange – zehn Jahre oder mehrere Jahrzehnte – dauernd dürft, bis sich ein ausreichend bestockter Jungwald einstellt. Wird der Mittelwert-Sollwert verwendet, fällt die Beurteilung – in diesem Fall – leicht positiver aus, indem die Verjüngung in je 12 Lücken gelungen und misslungen ist (Anhang Kap. 11.3.4, Abbildung 37). Wird die Verjüngung anderer Baumarten einbezogen, verbessert sich das Bild leicht: Die Verjüngung ist in 17 Lücken gelungen und in 10 misslungen, in weiteren 3 Lücken könnte der Aufwuchs-Sollwert in den nächsten Jahren noch erreicht werden. In den Lücken Grafschaft¹, Wangs und Obersaxen (einschichtig, 100% Fichtenanteil) ist sogar 20 Jahre nach dem Eingriff zu wenig Verjüngung vorhanden (Abbildung 20).

4.3.5 Gründe für das Erreichen bzw. Verfehlen von Stammzahl-Sollwerten der Verjüngung

Vorverjüngung für Verjüngungserfolg wichtig

Eine Betrachtung der 30 Lücken, unterteilt in solche mit gelungener, misslungener und möglicherweise noch gelingender Verjüngung, ergibt folgende Zusammenhänge (nur bezogen auf die Fichtenverjüngung): Die Verjüngung misslingt besonders häufig in Südexposition (Misserfolg in 6 von 11 Lücken), an Hängen mit Neigung >55% (in 8 von 12 Lücken), bei Lückenausrichtung nach Süden (in 6 von 9 Lücken) und bei einer Dauer seit dem Eingriff von <20 Jahren (in 13 von 25 Fällen). Viel trägt hingegen Vorverjüngung zum Verjüngungserfolg bei: In positiv beurteilten Lücken lag die Stammzahl der Fichten-Vorverjüngung (≥ 10 cm) bei fast 4000/ha, in negativ oder hoffnungsvoll beurteilten Lücken lag die Stammzahl der Vorverjüngung im Mittel bei 600/ha oder darunter (Abbildung 21 bzw. Abbildung 22 für Medianwerte). Dabei ist anzunehmen, dass zum Eingriffszeitpunkt noch mehr Fichtenvorverjüngung vorhanden war als bei der Inventur 8 bis 24 Jahre später, und ein Teil von ihr seither abgestorben ist. Deutlich ist auch, dass die Stammzahl der Vorverjüngung mit derjenigen der Nachverjüngung positiv korreliert, ein Hinweis auf allgemein verjüngungsgünstige bzw. –ungünstige Standorte.

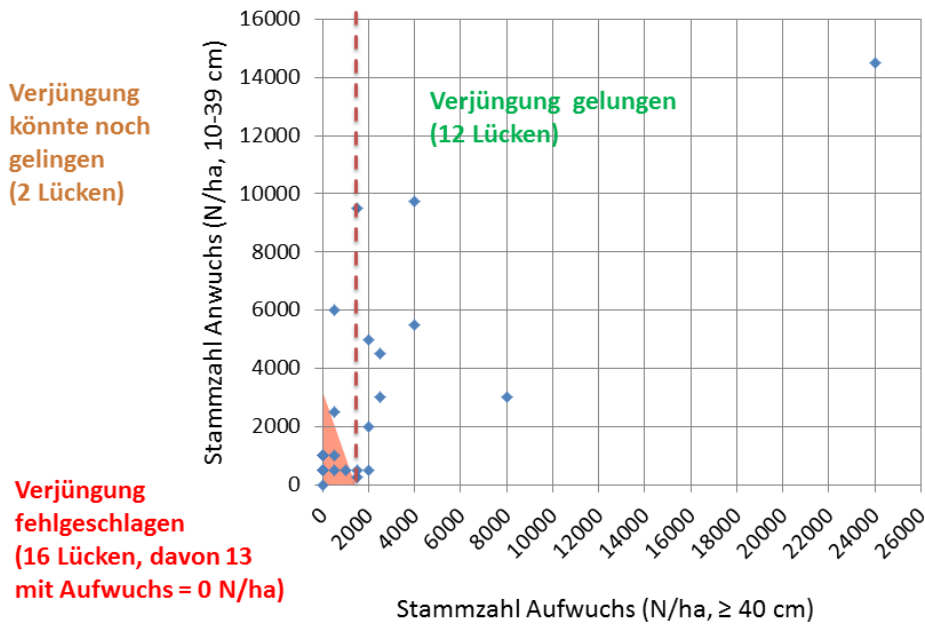


Abbildung 19. Verjüngungsdiagramm mit den Stammzahlen von Anwuchs und Aufwuchs der Fichten in den untersuchten 30 Lücken, bei Verwendung von Medianwerten als Sollwerte (vgl. Abbildung 37 in Kap. 11.3.4 mit Mittelwerten). Rechts der vertikalen grünen Linie ist der Aufwuchs-Sollwert erfüllt. Die Lage der orangen Fläche entspricht derjenigen in Abbildung 18.

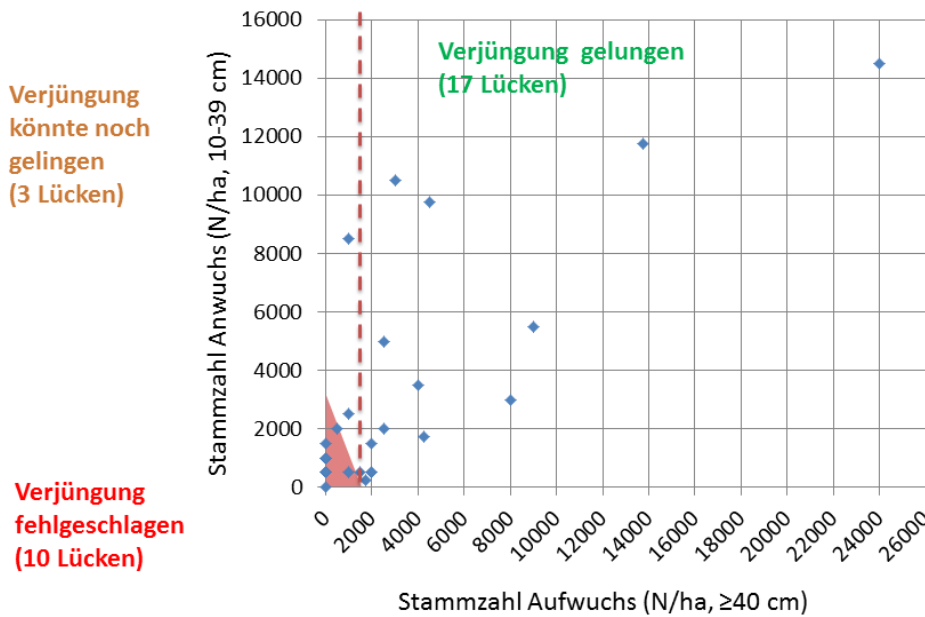


Abbildung 20. Verjüngungsdiagramm mit den Stammzahlen von Anwuchs und Aufwuchs aller Baumarten in den untersuchten 30 Lücken, bei Verwendung von Medianwerten als Sollwerte. 2 Lücken mit Aufwuchs-Stammzahlen von 41'000 bzw. 49'750/ha sind nicht dargestellt. Rechts der vertikalen grünen Linie ist der Aufwuchs-Sollwert erfüllt. Die Lage der orangen Fläche entspricht derjenigen in Abbildung 18.

Mehr Fichtenverjüngung als in dieser Studie trat aber auch in schmalen Verjüngungsschlitten in Fichtenwäldern der Surselva 15-19 Jahre nach dem Eingriff nicht auf (Gmür 2011, Hirsiger et al. 2013). Während die mittlere Stammzahl von Anwuchspflanzen (Höhe ≥ 10 cm) 15-19 Jahre nach dem Schlagen der Schlitten rund 3000/ha betrug und damit den Sollwert von Bühler (2005) übertraf, waren Aufwuchspflanzen mit Höhe ≥ 40 cm selten. Nach Gmür (2011) waren solche Pflanzen in Südexposition mit 544/ha vertreten, in Nordexposition nur mit 318/ha. Ein Sollwert von 2000/ha (für den

Fichtenverjüngung in schmalen Verjüngungsschlitten nicht dichter als in breiten Lücken, Aufwuchs sogar weniger vertreten

Stammzahl-Mittelwert pro Lücke) wird in Südexposition in einer von 9 Lücken erreicht, unter Einbezug des Anwuchses in 3 von 9 Lücken (Gmür 2011, Tabelle A2). In Lücken in Nordexposition sind die Zahlen 2 bzw. 8 von 27 Lücken. Die Sollstammzahlen waren also in etwa einem Drittel der Verjüngungsschlitzte erreicht⁵. Die meisten Lücken wären somit im «orangen» Bereich des Verjüngungsdiagramms gelandet, manche auch im «gelben» Bereich, in dem ein Verjüngungserfolg in einigen Jahren möglich scheint. In beiden Expositionen war der Verbisseeinfluss erheblich. Die Studie von Hirsiger et al. (2013) und unsere sind zwar nicht direkt vergleichbar, denn die erstgenannte war auf die standörtlich relativ homogene Surselva begrenzt. Dennoch scheint in diesen schmalen Verjüngungsöffnungen die Verjüngung nicht dichter aufzukommen als in den hier untersuchten grossen; dass sie in letzteren rascher wächst, muss angenommen werden.

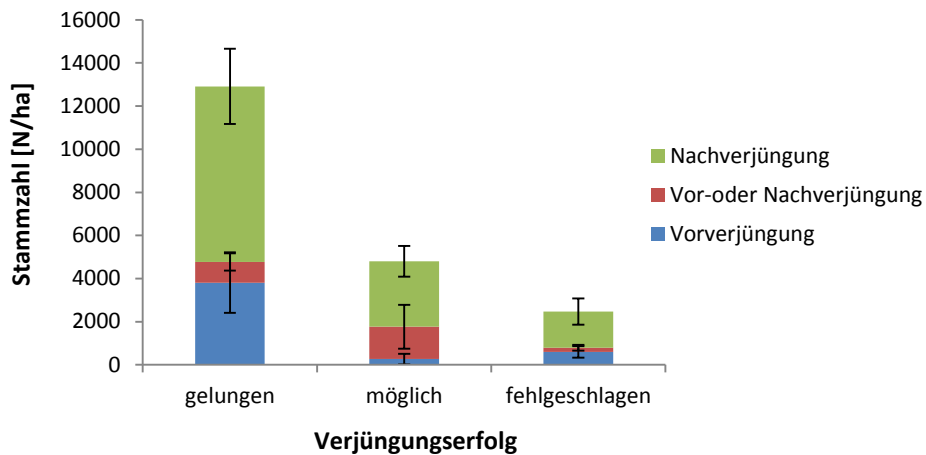


Abbildung 21. Stammzahl der Fichtenverjüngung (Höhe ≥ 10 cm) nach Verjüngungszeitpunkt in 30 Verjüngungslücken, in denen die Verjüngung der Fichte insgesamt gelungen ist, möglicherweise noch gelingen wird oder fehlgeschlagen ist.

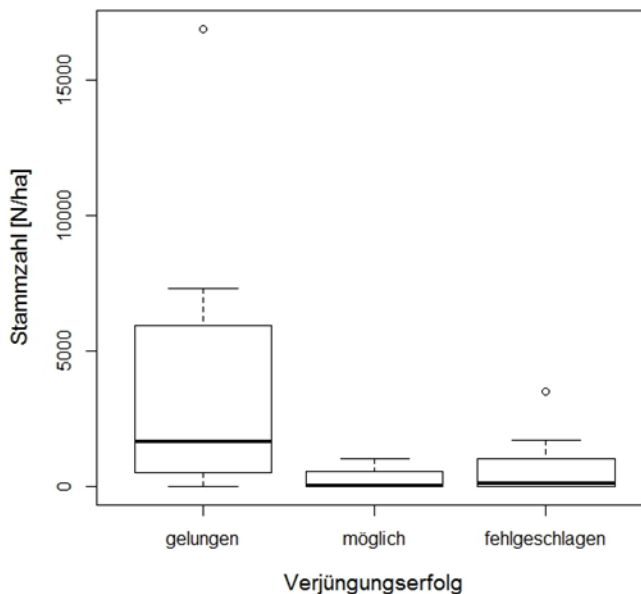


Abbildung 22. Boxplots der Stammzahl der Fichtenvorverjüngung nach Verjüngungserfolg, nur auf Fichte bezogen. Medianwerte: gelungen (1'675 N/ha), möglich (42 N/ha) und fehlgeschlagen (113 N/ha).

⁵ Gmür (2011) kommt zu einer positiveren Einschätzung, weil er auch Sämlinge einbezieht.

5 Einfluss grosser Verjüngungslücken auf den Volumenzuwachs im verbleibenden Bestand

5.1 Methoden

Die Zuwachsreaktionen von Fichten auf starke einseitige Freistellung wurden mittels dendrochronologischen Methoden untersucht (Rubino & McCarthy 2004). Diese erlauben es, den Einfluss von Umweltveränderungen, zum Beispiel einer Freistellung, auf den Durchmesserzuwachs von Bäumen retrospektiv festzustellen. Von zwei Gruppen von Fichten mit unterschiedlichen Standraumerweiterung wurden Bohrkerne entnommen: einer Gruppe mit stark freigestellten Bäumen im Randbereich der Verjüngungsöffnungen und einer Gruppe von im Bestand verbliebenen, höchstens leicht freigestellten Bäumen. An den Bohrkernen wurde die jährliche Jahrringbreite gemessen, und dann der Radialzuwachs in der Periode vor und nach dem Eingriff verglichen. Damit sollten folgende Fragen beantwortet werden: (1) Wie stark reagieren die Bäume auf die Veränderung ihres Standraumes? (2) Hängt diese Reaktion von Standorteigenschaften ab? (3) Welche Rolle spielt die Baumgrösse bei diesen Zuwachsreaktionen?

Die Studie wurde in vier mindestens 8 Jahre alten Verjüngungslücken in hochmontanen und subalpinen Fichten-Tannenwäldern durchgeführt (Anhang Kap. 10.1, Tabelle 8). Eine Lücke lag in der obermontanen Stufe. Zwei der Lücken befanden sich an nordwestlich exponierten Hängen mit nordöstlicher Lückenausrichtung, die anderen zwei waren nach Süden exponiert, mit südlicher Lückenausrichtung. Die Klimabedingungen unterschieden sich auch zwischen den vier Standorten: die Fläche in Sur En (Unterengadin) ist die warm-trockenste, die anderen drei Flächen sind klimatisch kühl und feucht eingestuft (Ariditätsindex DMI von > 90; Abbildung 23). Die Standorttypen nach NaiS waren 53*/54 (Sur En), 57 (Siat und Furna) und 18*/18w (Jenins). Von 1975 bis 2013 wurde das Klima arider (Abbildung 23), d.h. trockener und wärmer. Die abrupte Abnahme des DMI im Jahr 2003 in allen Untersuchungsflächen sticht ins Auge, wobei auch die Jahre 2004 bis 2007 tiefe DMI-Werte aufwiesen.

Zuwachsreaktion der Rand- und Bestandesbäume mit Bohrkerneanalysen von 4 Flächen untersucht.

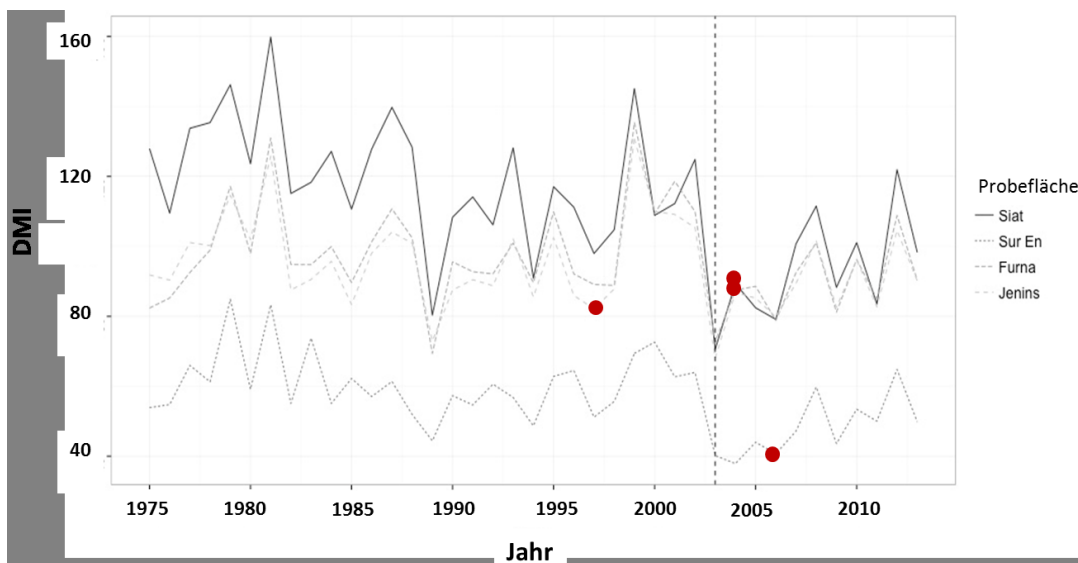


Abbildung 23. Entwicklung des Ariditätsindex DMI (de Martonne 1926) in der Periode 1975-2013 auf den Untersuchungsflächen Siat, Sur En, Furna und Jenins. Die roten Punkte markieren die Eingriffsjahre. Die vertikale gestrichelte Linie bildet das Trockenjahr 2003 ab.

Einige Bestandes- und Baumcharakteristika der Flächen sind in Tabelle 8 (Anhang Kap. 10.1) aufgeführt. Drei Altbestände sind aus Naturverjüngung entstanden, der jüngste Bestand Jenins ist dagegen eine Pflanzung. Die Lücken sind zwischen 35 m (Sur En) und 70 m (Furna und Siat) breit.

In jedem der angrenzenden Bestände wurde eine Probefläche (20 m x 40 m, Abbildung 24) angelegt, auf der jeder lebende Baum mit BHD $\geq 7,5$ cm kartiert und in 1 m Höhe über der Bodenoberfläche im Stamm gebohrt wurde. Die Methoden der Bohrkerntnahme und von deren Bearbeitung sind im

Anhang (Kap. 10.1) beschrieben. Jede der vier Probeflächen ist Teil einer neu angelegten ertragskundlichen Fläche, deren Entwicklung langfristig weiterverfolgt werden soll.

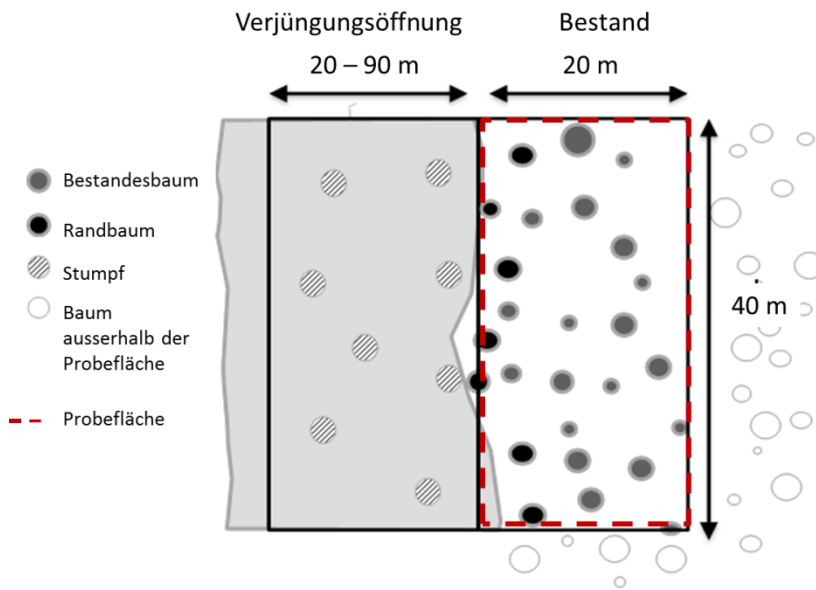


Abbildung 24. Schema einer Probefläche (rot, gestrichelt) zur Analyse der Zuwachsreaktion von Randbäumen auf einseitige Freistellung.

5.2 Ergebnisse und Interpretation

5.2.1 Verlauf und Ausmass der Freistellungseffekte

Zuwachsreaktion je nach Fläche uneinheitlich

Die Freistellungseffekte auf den radialen Zuwachs der Bäume waren flächenspezifisch. Der Radialzuwachs veränderte sich bei Randbäumen im Vergleich zu den Bestandesbäumen in Sur En mit ca. +60% am stärksten, in Furna mit +12% hingegen wesentlich schwächer (Tabelle 7). Auf den beiden südexponierten Flächen Siat und Jenins reagierten Rand- und Bestandesbäume hingegen ähnlich auf den Eingriff; Randbäume konnten vom erweiterten Wuchsraum nach dem Eingriff nicht profitieren. Wir vermuten, dass die einseitig freigestellten Bäume an Südhängen stärker in das Wurzelwachstum investierten, um ihren Zugang zu Wasser zu verbessern.

Tabelle 7. Veränderung des Radialzuwachses (PGC, Durchschnitt der 10 Jahre vor und nach dem Eingriff) für die Fichten auf den Untersuchungsflächen in Furna, Jenins, Siat und Sur En. Dargestellt sind Mittelwerte \pm Standardfehler. Die Buchstaben zeigen die signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Flächen und beiden Baumgruppen (Rand, Bestand; Tukey post hoc test, $p < 0.05$).

Fläche	Veränderung des Radialzuwachses [%]	
	Randbäume	Bestandesbäume
Furna	34.3 \pm 7.7 ^{ab}	22.6 \pm 5.7 ^{bc}
Jenins	-12.2 \pm 5.6 ^{cd}	-24.3 \pm 4.8 ^d
Siat	-5.6 \pm 9.7 ^{cd}	-9.2 \pm 5.8 ^{cd}
Sur En	61.3 \pm 14.5 ^a	-1.2 \pm 4.5 ^{cd}

Effekte klingen nach 7 bis 10 Jahren ab

Im zeitlichen Verlauf waren die Effekte mehrheitlich nur vorübergehend, indem sie 7 bis 10 Jahre andauerten; in Sur En hält der Effekt noch an und könnte auch noch länger bestehen (Abbildung 25). In Jenins zeigten sich deutliche Zuwachsunterschiede zwischen Rand- und Bestandesbäumen erst 2005, d.h. 8 Jahre nach dem Eingriff, was möglicherweise mit einer stressbedingten Zuwachsreaktion auf das Trockenjahr 2003 zu erklären ist. Fichten am Rand der Verjüngungsöffnung in Jenins erholten sich nach dem Trockenjahr anscheinend schneller als diejenigen im Bestand.

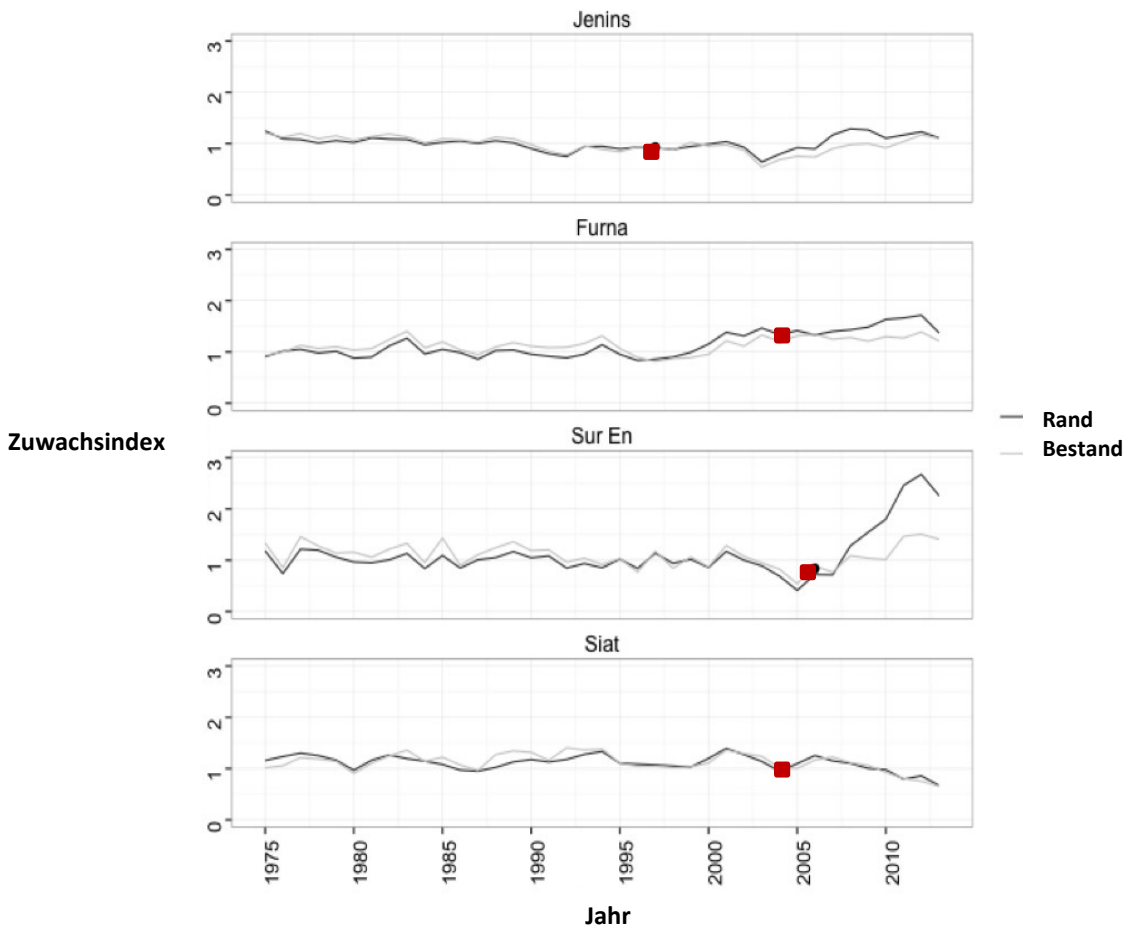


Abbildung 25. Zuwachsverlauf von Randbäumen (schwarz) und von Bäumen aus dem angrenzenden Bestand (grau) in vier Gebirgs-Fichtenwäldern. Die Zuwachsänderung ist hier in Form eines Zuwachsindexes standardisiert, um langfristige Trends (z.B. Alterstrend) zu entfernen und die Aussage auf kurzfristige Reaktionen (z.B. infolge Änderungen im Standraum) zu fokussieren. Ein Zuwachsindex über 1 bedeutet, dass die Jahrringbreite über dem Mittelwert der Periode 1975-2014 liegt, ein Index unter 1, dass sie darunter liegt. Die roten Punkte markieren die Eingriffsjahre.

Die Veränderung der Konkurrenzsituation der Randbäume vor und nach dem Schlag war flächenspezifisch und – bei Gleichheit aller übrigen Faktoren – nur signifikant in Furna und Sur En; im Gegensatz dazu war der Konkurrenzindex CI (Anhang, Eq. 2) der Randbäume in Jenins und Siat ähnlich zu demjenigen im Bestand (Abbildung 26). Generell war CI im Bestand im Mittel aller Flächen > 1.0, was auf zunehmende Konkurrenz in den nicht behandelten Bestandesteilen hinweist, insbesondere im Fall der Fichtenpflanzung in Jenins.

Eine Fallstudie mit insgesamt 12 Fichten am Rand einer Seillinie und im Bestandesinneren in einem subalpinen Fichtenwald bei Davos ergab – teils ähnlich wie in unserer Studie – eine Latenzphase ohne Zuwachsreaktion von 2 Jahren Dauer, danach eine Steigerung des Zuwachses, die 11 Jahre nach dem Holzschlag abzuklingen schien. Bäume, die am nach Norden exponierten Seillinienrand standen, reagierten stärker als solche am südlich exponierten Rand (Fehr et al. 2009).

Konkurrenzsituation der Randbäume nur auf 2 von 4 Flächen deutlich verbessert

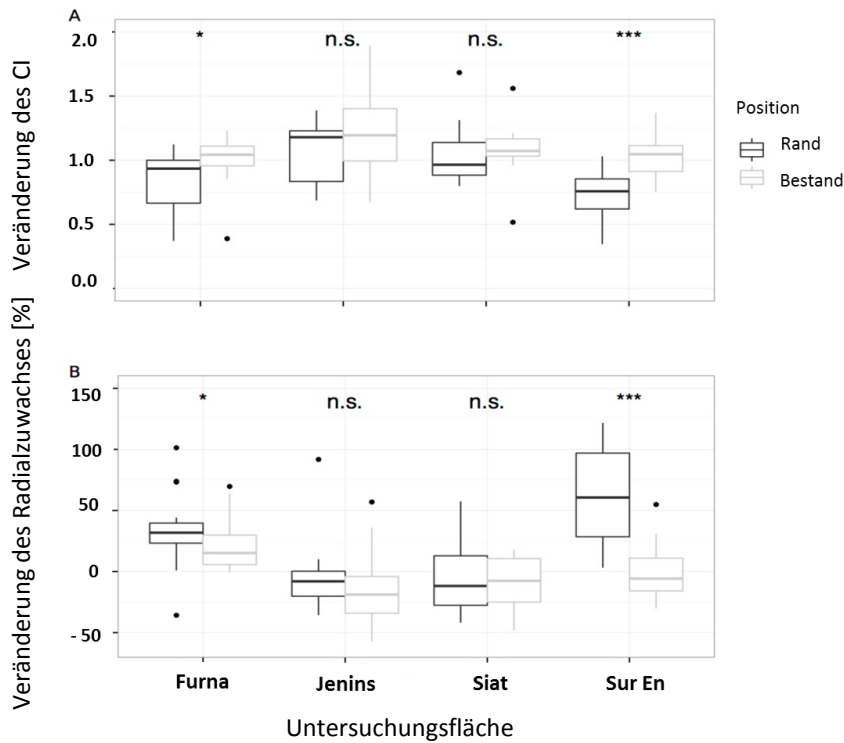


Abbildung 26. Boxplots der Veränderung des Konkurrenzindex CI (A) und des Radialzuwachses (B) der Bäume am Rand und im Bestand nach dem Eingriff. Die schwarzen Punkte zeigen individuelle Bäume als Ausreisser. Die Signifikanz (Wilcoxon rank sum test) der Unterschiede zwischen Rand und Bestand ist wie folgt angegeben: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; n.s. = nicht signifikant ($p > 0.05$).

5.2.2 Steuerung des Wachstums der Fichten

Standraumveränderung bestimmt Zuwachsreaktion

Die Veränderung des Radialzuwachses einzelner Bäume (Vergleich vor/nach Eingriff) versuchten wir mit einem statistischen Modell zu erklären. Als wichtiger Einflussfaktor erwies sich dabei die Veränderung im Standraum, abgebildet durch den Index CI. Weitere signifikante Faktoren waren die Baumposition sowie die Untersuchungsfläche (Anhang Kap. 11.2, Tabelle 10). Die Baumgrösse stand in Wechselwirkung mit der Baumposition: Im unbehandelten Bestand reduzierten dünnere Fichten ihren Radialzuwachs, was mit dem hohen Konkurrenzdruck zu erklären ist. Fichten in Randstellung zeigten hingegen auch bei BHD < 40 cm ähnlich wie stärkere Bäume ca. 20% Wachstumszunahme (Abbildung 27); dies zeigt, dass kleinere Fichten auf die Randstellung positiv reagieren können und so langfristig zur Stabilisierung der Ränder beitragen dürften.

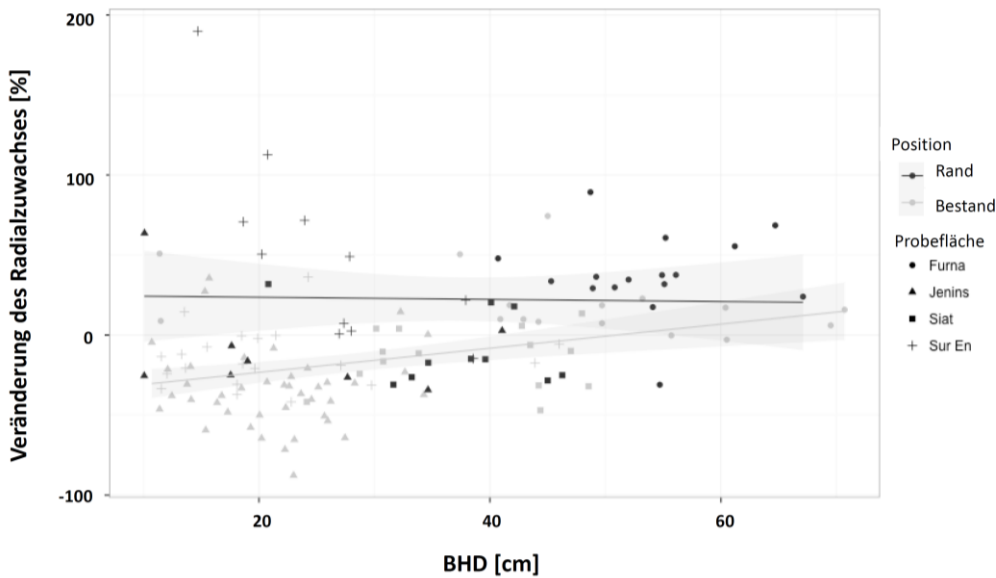


Abbildung 27. Abhängigkeit der Veränderung des Radialzuwachses (Vergleich vor/nach Eingriff) vom BHD.

Aufgrund der geringen Anzahl untersuchter Verjüngungslücken erlaubt die Studie weder eine allgemeingültige Quantifizierung der Effekte noch eine schlüssige Interpretation der Ursachen für die festgestellten Unterschiede zwischen den Lücken. Insgesamt kompensieren aber die kleinen Effekte den wegfallenden Zuwachs der genutzten Bäume bei weitem nicht. Als Erklärungen für die Unterschiede zwischen den Lücken kommen 1) Wassermangel in Südexposition und 2) die je nach Lücke unterschiedliche Konkurrenzsituation in Frage. Zu 1) Eine Wirkung der Freistellung auf den BHD-Zuwachs wurde nur an Randbäumen der nach Nordwesten exponierten Flächen gefunden. Eine mögliche Interpretation ist, dass die Bäume dort am meisten von ihrem erweiterten Wuchsraum profitieren konnten, weil das Wasser das Wachstum nicht oder weniger limitierte. In den zwei nach Süden exponierten Untersuchungsflächen förderte die Standraumerweiterung durch die Lücken das Wachstum der Randbäume kaum, mit Ausnahme einer möglicherweise verbesserten Erholung nach dem extremen Trockenjahr 2003. Zu 2) In Jenins und Siat wurde der Schlagrand entlang eines inneren Waldrands gelegt, weshalb viele Randbäume lange Kronen aufweisen und auf die zusätzliche Freistellung kaum reagierten. Dafür spricht auch, dass sich der Konkurrenzindex bei Bäumen am Rand und im Bestand ähnlich entwickelte (Abbildung 26).

Die variablen Zuwachsreaktionen der Randbäume auf die Freistellung machen eine Hochskalierung der Effekte auf ganze Hänge (i.e. flächenbezogen) sehr unsicher. Sie liegen aber in einer ähnlichen Grössenordnung wie in kleinen Verjüngungsschlitten (Lusiwald, Davos), wo Fichten in Randstellung innert weniger Jahre 17% mehr Zuwachs leisteten als Bäume im Bestandesinneren (Bräker & Baumann 2006). Aus den Ergebnissen der 4 Verjüngungslücken ergeben sich keine Hinweise, dass dabei deren Breite eine Rolle spielt. Ein allfälliger «Kompensationseffekt» durch vermehrten Zuwachs von Randbäumen dürfte bei grossen Lücken mit anteilmässig kleinen Randbereichen gering ausfallen. Bei Eingriffen, welche die Holzentnahme auf mehr und dafür kleinere Öffnungen verteilen, sind die Kompensationseffekte höher.

Kleine Zahl der Fallstudien und grosse Variabilität der Zuwachsreaktion verunmöglicht allgemeine Aussagen zur Grösse der Zuwachsreaktion

6 Einfluss einer langen Hiebsruhe auf den nutzbaren Zuwachs

6.1 Hintergrund und Methoden

Hintergrund dieser Teilstudie stand die Vermutung, dass eine lang andauernde Hiebsruhe zu dichteren Beständen und schliesslich zu erhöhter konkurrenzbedingter Mortalität führt. Eingriffe, die sich auf die Schaffung grosser Lücken beschränken, aber die angrenzenden Bestände unberührt lassen, könnten eine solche Hiebsruhe fördern, da in diesen Bestandesteilen oft erst wieder eingegriffen werden wird, wenn sich in den grossen Lücken ein stabiler Jungwald etablieren konnte. Zur Untersuchung dieser Fragen wurden LFI-Daten verwendet, aus denen die 1008 Probeflächen mit mindestens 70% Grundflächenanteil der Fichte ausgewählt wurden. Betrachtet wurden die jährlichen Mortalitätsraten zwischen dem LFI1 (1983-1985) und dem LFI2 (1993-1995) bzw. dem LFI2 und dem LFI3 (2004-2006), von Bäumen mit BHD ≥ 36 cm. Zur Ableitung der jährlichen Mortalitätsraten wurden die Anzahl der bei der jeweils 2. Inventur abgestorbenen Bäume pro Probefläche in Bezug gesetzt zur Anzahl der bei der jeweils 1. Inventur lebenden Bäume. Diese Raten wurden dann durch die Periodendauer (in Jahren) geteilt. Die Dauer der Hiebsruhe wurde mit der Variable «Dauer seit dem letzten Eingriff» zu Beginn der jeweiligen Periode abgebildet.

Die kleine Bezugsfläche von 500 bzw. 200 m² der LFI-Probeflächen führt zwar dazu, dass ein einzelner absterbender Baum die Mortalitätsrate einer Probefläche erheblich beeinflusst. Diese Variabilität ist jedoch wegen der grossen Anzahl Probeflächen unproblematisch.

6.2 Ergebnisse und Interpretation

Zwischen LFI1 und LFI2 lag die mittlere jährliche Mortalitätsrate in den ausgewählten fichtenreichen Beständen bei 0,36%; diese Periode schliesst den Sturm Vivian (1990) ein. In den folgenden 11 Jahren zwischen LFI2 und LFI3 lag die Mortalitätsrate wesentlich höher, bei 1,98% pro Jahr, wobei in dieser Periode die Stürme Lothar und Martin (2000) und der Hitzesommer 2003 auftraten. Störungsbedingte Mortalität, die im LFI nicht von konkurrenzbedingter Mortalität getrennt werden kann, hat erheblich zu diesen Raten beigetragen. Dies zeigt sich auch im grossen Anteil von Probeflächen ohne jede Mortalität: Zwischen LFI1 und LFI2 starben auf 94% der 1'010 Probeflächen gar keine Bäume ab, zwischen LFI2 und LFI3 auf 85% der Probeflächen.

Während in der Periode zwischen LFI1 und LFI2 bei einer Hiebsruhe von über 50 Jahren die Mortalität erhöht war, war dies in der Periode zwischen LFI2 und LFI3 höchstens tendenziell der Fall (Abbildung 28). Wir interpretieren dies wie folgt: Der Zusammenhang besteht zwar, aber er wird von störungsbedingter Mortalität maskiert und tritt erst nach vielen Jahrzehnten Hiebsruhe auf. Auch mindestens 50 Jahre fehlende Nutzung führen anscheinend – aufgrund der niedrigen Ausgangsdichte nach vielen Jahrzehnten intensiver Waldnutzung – noch nicht zu einer so hohen Bestandesdichte, dass in erheblichem Umfang konkurrenzbedingte Mortalität auftritt. Wir sehen zudem keinen Zusammenhang zwischen Bestandesdichte und Mortalität, wahrscheinlich wieder wegen Maskierung durch störungsbedingte Mortalität (Abbildung 29). Anders gesagt: Bei der Fichte ist störungsbedingte Mortalität so häufig, dass dichtebedingte Mortalität kaum zum Tragen kommt. Eine andere Schweizer Studie stützt diese Interpretation: Bei der Fichte dürfte störungsbedingte Mortalität wichtiger sein als dichteabhängige; so finden Etzold et al. (2015, S. 37) in Hochlagen keinen signifikanten Einfluss der Bestandesdichte ($p=0.09$) auf die Mortalität. Insgesamt ist also die empirische Evidenz für einen straffen Zusammenhang zwischen langer Nichtnutzung und Zuwachsverlust durch zunehmende Baum mortalität gering.

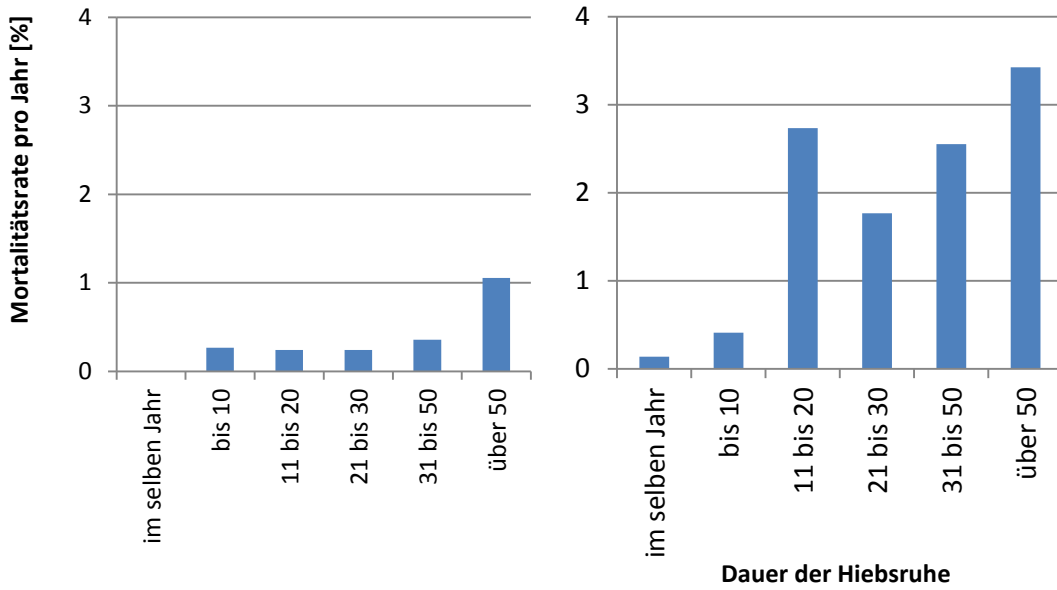


Abbildung 28. Zusammenhang zwischen Dauer der Hiebsruhe und der jährlichen Mortalität in fichtenreichen Beständen zwischen LFI1 und LFI2 (a) und LFI2 und LFI3 (b).

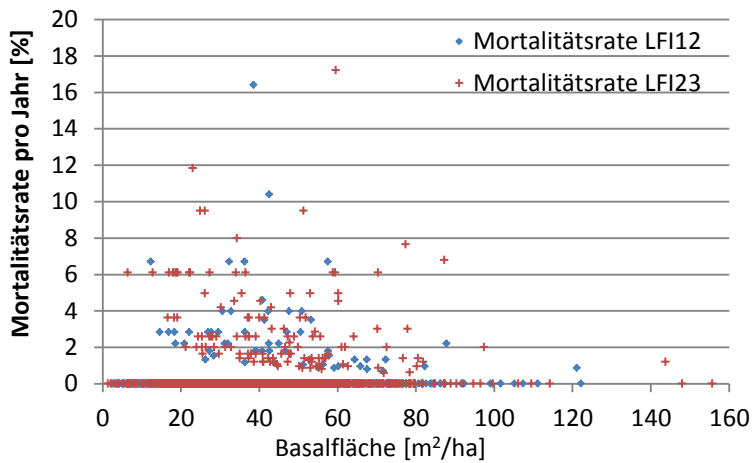


Abbildung 29. Zusammenhang zwischen Basalfläche als Mass der Bestandesdichte und der jährlichen Mortalität in fichtenreichen Beständen zwischen LFI1 und LFI2 sowie zwischen LFI2 und LFI3.

7 Synthese und Ausblick

7.1 Naturverjüngung und Zuwachs von Randbäumen in grossen Lücken

Fichtenverjüngung in grossen Lücken in 40% der Lücken erfolgreich, in 53% ein Fehlschlag. Bei Beizug aller Baumarten Erfolgsquote bei 55%. Ein besserer Verjüngungserfolg in kleinen Lücken ist aber nicht nachgewiesen.

Die Naturverjüngung in den grossen Lücken und in deren Randbereich ist sehr variabel und von Fichte dominiert. Die Studie bestätigt in vielem, was zur Verjüngungsökologie der Fichte bekannt ist, zum Beispiel die Bedeutung erhöhter Kleinstandorte und hemmender Konkurrenzvegetation (s. Präsenzmodelle). Die Beurteilung der Fichtenverjüngung aufgrund weiter entwickelter Stammzahl-Sollwerte ergibt, dass sie nach 8-24 Jahren in rund 40% der Lücken erfolgreich war, in 7% der Lücken evtl. in wenigen Jahren noch gelingt und in 53% der Lücken fehlschlug. Wird die Verjüngung anderer Baumarten berücksichtigt, war die Verjüngung in rund 55% der Lücken erfolgreich, könnte in 10% möglicherweise in wenigen Jahren noch gelingen und schlug in 35% der Lücken fehl. In den Lücken mit fehlgeschlagener Verjüngung ist damit zu rechnen, dass sie mehrere Jahrzehnte lang spärlich bestockt bleiben. In anderen Lücken dürften dagegen in den nächsten Jahren noch viele Sämlinge in den Anwuchs und Aufwuchs einwachsen. In Lücken mit erfolgreicher Verjüngung war oft die Vorverjüngung reichlich vorhanden. Die einzigen verfügbaren Ergebnisse aus kleinen Verjüngungsöffnungen (Hirsiger et al. 2013) weisen darauf hin, dass dort die Verjüngung nicht besser gelingt als in den hier untersuchten grossen Lücken. Allerdings ist ungewiss, inwiefern diese Flächen als «Best Practice»-Beispiele für den Verjüngungsprozess in kleinen Lücken betrachtet werden können; u.a. dürfte dort der Wildeinfluss relativ hoch sein.

Bäume an Lückenträndern reagieren oft, aber nicht durchwegs mit Zuwachssteigerung, und das Ausmass ist unterschiedlich

Die an den Rändern grosser Lücken freigestellten Bäume reagieren – allerdings nicht auf allen Flächen – während rund 10 Jahren, evtl. auch länger mit einem erhöhten Zuwachs. Dieser Effekt zeigt sich nicht auf allen Standorten, was verallgemeinernde Aussagen erschwert. Die Grössenordnung der mittleren Zunahme des Durchmesserzuwachses von etwas über 20% (Abbildung 27) bei den für den Zuwachs massgebenden Bäumen mit BHD>40 cm wird durch eine kleine Studie von Bräker & Baumann (2006) bestätigt. Auch Untersuchungen zur Wirkung von Durchforstungen auf den Zuwachs von Fichten ergeben ähnliche Effekte (Juodvalkis et al. 2015). Erste Resultate einer Analyse mit LFI-Daten (100 Probekreise mit Fichtendominanz und Schlagrändern) ergaben Zuwachssteigerungen des BHDs der Randbäume um über 30%⁶. Ob der Effekt am einzelnen Schlagrand bei breiten Lücken grösser ist als bei schmalen, kann mit unseren Daten nicht beurteilt werden. Dagegen spricht, dass Fichten auch nach Durchforstungen den Stammzuwachs steigern. Bei grossen Randlängen pro Waldfläche (d.h. bei zahlreichen kleinen Verjüngungsöffnungen anstelle von wenigen grossen) ist aber von einem stärkeren Zuwachsschub auszugehen als bei geringen Randlängen.

7.2 Abschätzung der Auswirkung grosser Lücken auf den Holzzuwachs

Verlässliche Abschätzung des Einflusses grosser Verjüngungslücken auf den Zuwachs aufgrund der heterogenen Ergebnisse nicht möglich

Das ursprüngliche Projektziel, den Einfluss grosser Verjüngungslücken auf den Holzzuwachs zu quantifizieren, erwies sich als unerreichbar. Dazu trugen folgende Faktoren bei: Die geringe Anzahl verfügbarer grosser Verjüngungslücken; die grosse Variabilität a) der Naturverjüngung und b) der Zuwachsreaktionen von Randbäumen am Lückentrand; und die relativ kurze Dauer von 8 bis 24 Jahren nach dem Holzschlag, wegen der es besonders bei der Verjüngung für eine definitive Beurteilung zu früh ist. Effekte grosser Verjüngungslücken auf den langfristigen Holzzuwachs – im Vergleich zu kleinen – konnten daher nicht generell quantifiziert werden.

Mit einem Schätzmodell wurde dennoch versucht, die Teilbefunde für die Bewertung grosser Verjüngungslücken zusammenzuführen (Anhang Kap. 11.5). Mit dem Modell lässt sich die Zuwachsveränderung auf der Ebene eines Hanges (z.B. 100 ha) mit einem Durchschnittsvorrat (z.B. 500 m³/ha) gleichzeitig bei drei Bewirtschaftungsszenarien über 50 Jahre abschätzen. Das Modell weist die Zuwachsveränderung infolge Minderzuwachses im Jungwald, Unterbestockung in Verjüngungslücken und erhöhter Mortalität im Restwald, die Zuwachskompensation bei Randbäumen und den Saldo der Auswirkung auf den Zuwachs aus. Mehrere entscheidende Eingabegrössen in das Modell können aufgrund der Projektergebnisse und des Standes des Wissens nur ungenau geschätzt werden. Das Modell erlaubt es daher nicht, Zuwachseinbussen zu «berechnen». Vielmehr bietet es die Möglich-

⁶ Yue & Kohnle, unveröffentlichtes Material.

keit, durch die Prüfung unterschiedlicher Varianten das Verständnis dafür zu schärfen, wie sich unterschiedliche waldbauliche Entscheide auswirken.

Die Ergebnisse der Teilstudien erlauben es immerhin einzuordnen, wie sich die relative Bedeutung der Teilprozesse zeitlich entwickelt: Zuerst ist damit zu rechnen, dass der Zuwachs von Randbäumen ansteigt. Dieser Effekt dürfte rund zehn Jahre anhalten. Eine allfällige Verjüngungsverzögerung dürfte sich auf den Zuwachs erst dann auswirken, wenn die Jungpflanzen Derbholz produzieren, was je nach Standort wenige bis einige Jahrzehnte braucht. Bei reichlicher Vorverjüngung tritt der Effekt kaum ein, bei spärlicher oder fehlender Verjüngung ist er erheblich und hält über viele Jahrzehnte an. Ob erhöhte Mortalität in unbehandelten Bestandteilen auftritt, hängt von der Ausgangsdichte ab. In dichten Beständen dürfte dies rasch der Fall sein, in Beständen mittlerer Dichte dürfte es rund fünf Jahrzehnte dauern.

7.3 Weitere Auswirkungen grosser Lücken und waldbauliche Bewertung

Grosse Verjüngungslücken beeinflussen nicht nur den Holzzuwachs. In Schutzwäldern vermindern sie die Schutzwirkung gegen Naturgefahren und sind daher nicht zulässig (Frehner et al. 2005). Grosse Lücken können das Landschaftsbild beeinträchtigen. Sie dürften die Artenvielfalt von Pflanzen und Tieren erhöhen, weil sie das Spektrum der verfügbaren Habitate erweitern, ähnlich wie das grosse Sturmflächen tun (Duelli et al. 2002).

Mit grossen Lücken lassen sich zwar grosse Holzmengen bei verhältnismässig geringen Erntekosten mobilisieren. Allerdings ist der Kostenvorteil primär an die Nutzungsmenge pro Seillänge gebunden und ab mässiger Eingriffsstärke nur noch sehr gering.

Der Verjüngungserfolg in grossen Lücken ist oft nur schwer vorhersehbar. Kleinkahlhiebe sind daher – ausser in den nachfolgend beschriebenen Ausnahmefällen – riskant, weil der Jungwald häufig über lange Zeit nur locker aufkommt. Waldbaulich vertretbar sind grosse Lücken im Nichtschutzwald bei reichlicher Vorverjüngung. In besonderem Mass gilt das in Nordexposition. Ist eine reichliche Vorverjüngung vorhanden, können grosse Lücken im Nichtschutzwald die Palette der Eingriffsmöglichkeiten durchaus bereichern. Allerdings stellt sich diese Vorverjüngung nicht einfach ein, sondern nur nach einer Auflichtung des Kronendachs, sei es durch Lichtungshiebe zur Einleitung der Verjüngung oder durch kleinflächige Störungsereignisse. Falls die Vorverjüngung gelungen ist, stellen grosse Lücken zwar keine alleinige, aber immerhin eine zusätzliche Handlungsoption dar. Vorverjüngung hat daher nicht nur im Schutzwald Vorteile, sondern sie eröffnet auch sonst Handlungsspielräume für Folgeeingriffe.

Bei einem kleinflächigen Vorgehen ist ein Fehlschlagen der Verjüngung aus folgenden Gründen weniger folgenschwer als bei grossen Lücken:

1. Die für die weitere Ansamung eher günstigen Randbereiche nehmen grössere Flächenanteile ein. In diesen Randbereichen stellt sich Vorverjüngung ein, und bei deren Freistellung besteht die Chance, zusätzlich Nachverjüngung zu erhalten.
2. Falls die Verjüngung in grossen Lücken misslingt, besteht – neben dem blossen Akzeptieren des Misserfolgs über Jahrzehnte – nur noch die Handlungsoption der Pflanzung, wobei meist ein in Gebirgswäldern sehr kostspieliger Wildschutz nötig ist. Die Pflanzen müssen zudem mit grossem Aufwand über Jahre von der Konkurrenzvegetation befreit werden. In kleinen Lücken kann man bei einem Fehlschlag auf deren Randbereiche zählen (s. voranstehender erster Grund)
3. Der grössere Flächenanteil von Schlagrändern kann Zuwachseinbussen vermindern, weil die Randbäume den gewonnenen Wuchsraum teilweise in Zuwachs umsetzen können.

Mit grossen Lücken in Gebirgswäldern gehen Handlungsspielräume verloren, weil in ihnen die Verjüngung nach dem Schlag in einem Zeitfenster von 20-40 Jahren ankommen sollte. Bei kleinen Lücken können im Gegensatz zu grossen Lücken allfällige lokale Misserfolge der Verjüngung durch Erfolge auf benachbarten Flächen, zu anderen Zeitpunkten, leichter kompensiert werden.

7.4 Ausblick und offene Fragen

Das Projekt «Eingriffsstärke im Gebirgswald» hat teilweise überraschende Resultate erbracht. Überraschend war die grosse Reaktionsbreite von Randbäumen auf Freistellung. Hier bestehen grosse Standortsunterschiede, die wir erst schlecht verstehen. Überraschenderweise erfüllte sich die ur-

Grosse Verjüngungslücken haben viele Nachteile, sind aber in Ausnahmefällen eine Handlungsoption

Fehlschlagen der Verjüngung in kleinen Lücken weniger folgenschwer als in grossen

sprüngliche Erwartung, dass die Verjüngung in grossen Lücken im Vergleich zu kleinen Lücken allgemein spärlicher und verzögert aufkommt, nur teilweise.

Das Projekt hat auch gezeigt, dass manche «Lehrmeinungen» im Gebirgswaldbau bisher nur ungenügend wissenschaftlich abgestützt sind. Die Ergebnisse der Gebirgswaldforschung ermöglichen es in vielen Bereichen noch nicht, konkrete und robuste Empfehlungen zur waldbaulichen Behandlung von Gebirgsnadelwäldern bereitzustellen. Die Beantwortung der offenen Fragen mit quantitativen wissenschaftlichen Methoden ist jedoch methodisch anspruchsvoll und aufwändig. Forschungsbedarf besteht insbesondere zu den nachstehend aufgeführten Fragen:

1. Bei welchen Waldstrukturen stellt sich (Vor)Verjüngung erfolgreich ein? Welche Rolle spielen dabei Randbereiche von Lücken (Schlagränder)? Bei welchem waldbaulichen Vorgehen stellt sich Vorverjüngung bei hohem Holzvorrat (und damit hohem Zuwachs und guter Schutzwirkung) ein?
2. Wie entwickeln sich nach einem Holzschlag die Verjüngung und der daraus entstehende Jungwald sowie die Kleinstandortsgunst (besonders Vegetation) in kleinen und grossen Lücken langfristig (d.h. über 30-50 Jahre)?
3. Welche Verjüngung ist mit Best Practice erreichbar? Entsprechen die in Hirsiger et al. (2013, Fussnote auf S. 7) dokumentierten Verjüngungszustände bereits der Best Practice?
4. Welche Indikatoren und Sollwerte (=Schwellenwerte für Indikatoren) sind für die Beurteilung von Verjüngung im einzelnen Bestand und in Inventuren geeignet? Wie müssen sie angewendet werden, um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen? Eine Methode zur Beurteilung der Verjüngung müsste es – im Gegensatz zu allen heute verfügbaren Methoden – auch erlauben, Lücken in der Verjüngung, d.h. zusammenhängende unverjüngte Flächen, zu erfassen. Eine solche Methode wäre auch wichtig, um die Folgen des teilweise starken Huftiereinflusses auf die Waldverjüngung (Kupferschmid et al. 2015) besser nachzuweisen.

Anhänge

8 Literaturverzeichnis

- Amt für Wald und Naturgefahren, AWT, AFG. 2010. Rundholzmarkt Graubünden. Handlungsempfehlungen zur Erhöhung des Angebots von sägefähigem Rundholz im Kanton Graubünden. AWN, Chur.
- Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden. 2012. Jahresbericht 2012 40 S. AWN, Chur.
- Assmann E. 1961. Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft, München, 490 S.
- Baader G. 1952. Untersuchungen über Randschäden. Schriftenreihe der forstlichen Fakultät der Universität Göttingen 3: 73 S.
- 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(1-2): 137-149.
- Bachofen H, Zingg, A. 2005. Auf dem Weg zum Gebirgsplenterwald: Kurzzeiteffekte von Durchforstungen auf die Struktur subalpiner Fichtenwälder. Schweiz Z Forstwes 156: 456-466.
- [Badoux H]. 1983. Ertragstafeln. Tables de production. Fichte. Epicéa. Birmensdorf, Eidg Anst Forstl Vers wes.
- Brang P. 1996. Experimentelle Untersuchungen zur Ansamungsökologie der Fichte im zwischenalpinen Gebirgswald. Dissertation, ETH Zürich, Zürich. Beih Z Schweiz Forstver. 375 S.
- Brang P, Duc P. 2002. Zu wenig Verjüngung im Schweizer Gebirgs-Fichtenwald: Nachweis mit einem neuen Modellansatz. Schweiz Z Forstwes 153: 219-227.
- Brang P, Hallenbarter D. 2007. Bewertung von Handlungsstrategien in Schutzwäldern: Ein integraler Modellansatz. Schweiz Z Forstwes 158: 176-193.
- Brang P, Moran J, Puttonen P, Vyse A. 2003. Regeneration of *Picea engelmannii* and *Abies lasiocarpa* in high-elevation forests of south-central British Columbia depends on nurse logs. The Forestry Chronicle 79(2): 273-279.
- Brang P, Schönenberger W, Bachofen H, Zingg A, Wehrli A. 2004. Schutzwalddynamik unter Störungen und Eingriffen: Auf dem Weg zu einer systemischen Sicht. Forum Wissen 2004: 55-66.
- Brang P, Schönenberger W, Frehner M, Schwitter R, Thormann JJ, Wasser B. 2006. Management of protection forests in the European Alps: an overview. For Snow Landsc Res 80(1): 23-44.
- Brang P, von Felten S., Wagner S. 2005. Morning, noon, or afternoon. Does timing of direct radiation influence the growth of *Picea abies* seedlings in mountain forests? Ann For Sci 62: 697-705.
- Buchli J. 1997. Beurteilung des minimal notwendigen Verjüngungsanteils in subalpinen Schutzwaldkomplexen anhand eines Fallbeispiels in Sedrun. Diplomarbeit, ETH Zürich, Professur für Forsteinrichtung und Waldwachstum: 85+17 S.
- Bühler U. 2005. Jungwaldentwicklung als Eingangsgrösse in die Jagdplanung: Erfahrungen aus dem Kanton Graubünden. Forum Wissen 2005: 59-65.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2013: Waldpolitik 2020. Visionen, Ziele und Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Bern: 66 S.
- Bürgi P, Pauli B. 2013. Ansätze zur Senkung der Holzerntekosten in der Schweiz. Schweiz Z Forstwes 164(6): 148-157.
- Burton PJ. 2002. Effects of clearcut edges on trees in the sub-boreal spruce zone of Northwest-Central British Columbia. Silva Fennica 36: 329-352
- Dieler J, Seifert T, Pretzsch H. 2008. Wuchseffizienz stark freigestellter Fichten auf unterschiedlichem Standort. In: Nagel J (Red.) Beiträge zur Jahrestagung 2008. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: SS. 111-122

- Duc P, Brang P. 2003. Die Verjüngungssituation im Gebirgswald des Schweizerischen Alpenraumes. Schriftenreihe des Bundesamtes und Forschungszentrums für Wald 130: 31-50.
- Duelli P, Obrist MK, Wermelinger B. 2002: Windthrow-induced changes in faunistic biodiversity in alpine spruce forests. For Snow Landsc Res 77, 1/2: 117-131.
- Etzold S, Wunder J, Braun S, Rohner B, Bigler C, Abegg M, Rigling A. 2016. Mortalität von Waldbäumen: Ursachen und Trends. In: Plüss AR, Brang P, Augustin S. (Red.) Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bern, Birmensdorf; Bern, Stuttgart, Wien, Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgen Forschungsanstalt WSL; Haupt: 177-197.
- Fachstelle für Gebirgswaldpflege. 2005. Einfluss der Eingriffsstärke im Schutzwald auf die Waldentwicklung und die Kosten der Holzernte. Jahresthema `04. Maienfeld, 4 S.
- Fachstelle für Gebirgswaldpflege. 2009. Waldbauliche Eingriffsstärke. Unveröffentlichte Kursunterlagen zu Kursen für das Amt für Wald Graubünden. Maienfeld, 13 S.
- Fehr M, Bjergager C, Brücker R, Schmidt M, Witzel G. 2009. Reaktion von *Picea abies* auf einseitige Freistellung im subalpinen Gebirgswald. Bohrkern-Analyse zwölf Jahre nach einer Seilliniendurchforstung in der Region Davos. Arbeitsbericht zum Gebirgswaldpraktikum 2009. 10 S., unveröff.
- Frehner M, Wasser B, Schwitter R. 2005/2009. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern, Bundesamt für Umwelt.
- Grissino-Mayer HD. 2003. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer. Tree-Ring Res. 59, 63-79.
- Hirsiger E, Gmür P, Wasem U, Wunder J, Brang P. 2013. 10 Jahre Erfolgskontrolle in schlitzförmigen Lücken. Wald Holz 94(3): 29-32
- Hülsmann L. 2016. Tree mortality in Central Europe: Empirically-based modeling using long-term datasets. PhD Dissertation, ETH Zurich. 201 p.
- Hunziker U, Brang P. 2005. Microsite patterns of conifer seedling establishment and growth in a mixed stand in the southern Alps. For Ecol Manage 210: 67-79.
- Jönsson MT, Fraver S, Jonsson BG, Dynesius M, Rydgård M, Esseen PA. 2007. Eighteen years of tree mortality and structural change in an experimentally fragmented Norway spruce forest. For Ecol Manage 242: 306–313.
- Juodvalkis A, Kairiukstis L, Vasiliauskas R. 2005. Effects of thinning on growth of six tree species in north-temperate forests of Lithuania. Eur J Forest Res 124: 187–192
- Keller W. 1978. Einfacher ertragskundlicher Bonitätsschlüssel für Waldbestände in der Schweiz. Mitteilungen der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen 54: 98 S.
- Köchli DA, Brang P. 2005. Simulating effects of forest management on selected public forest goods and services: a case study. For Ecol Manage 205(1-2): 57-68.
- Kohnle U, Yue C, Cullmann D. 2004. Wachstum der Weisstanne in Südwestdeutschland: Entwicklung, Klima-Risiko und Verjüngung. LWF Wissen 66: 41-66.
- Kramer H. 1988. Waldwachstumslehre. Ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit. Paul Parey, Hamburg, 374 S.
- Kupferschmid AD, Brang P, Schönenberger W, Bugmann H. 2006. Predicting tree regeneration in *Picea abies* snag stands. Eur J For Res 125: 163-179.
- Lee WK, von Gadow K. 1996. Iterative Bestimmung der Konkurrenz bäume in *Pinus densiflora*-Beständen. Allg Forst- Jagdztg 168, 41-45.
- Mäkinen H, Isomäki A. 2004. Thinning intensity and growth of Norway spruce stands in Finland. Forestry 77: 349-364.
- Maliva R, Missimer T. 2012. Arid lands water evaluation and management, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- de Martonne E. 1926. Une nouvelle fonction climatologique. L'indice d'aridité. La Météorologie, 449-458.
- Metslaid M, Jõgiste K, Nikinmaa E, Moser WK, Porcar-Castell A. 2007. Tree variables related to growth response and acclimation of advance regeneration of Norway spruce and other coniferous species after release. For Ecol Manage 250, 56-63.
- Pfister O, Nilsson U, Gemmel P. 2008. Influence of gaps on some selected tree characteristics of edge trees in Norway spruce plantations. For Ecol Manage 255: 2643–2649.
- Pretzsch H. 2006. Von der Standflächeneffizienz der Bäume zur Dichte-Zuwachs-Beziehung des Bestandes. Beitrag zur Integration von Baum- und Bestandesebene. Allg Forst- Jagdztg 177: 188-199.
- R Development Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Rohrer L. 2006. Mortalität von Einzelbäumen auf Lothar-Sturmflächen und in den umgebenden Bestandesrändern: Beobachtete Raten und mögliche Einflussfaktoren auf sechs Flächen des schweizerischen Mittellandes. Masterarbeit, Dept. Forstwissenschaften, ETH Zürich: 62 S.
- Rubino DL, McCarthy BC. 2004. Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events. Dendrochronologia 21, 97-115.
- Schodterer H. 2000. Grundlagen für die Beurteilung der Wildschäden an der Verjüngung im österreichischen Wald im Rahmen der österreichischen Waldinventur. Diss, Univ Bodenkultur, Wien.
- Schodterer H. 2001. Grundlagen für die Beurteilung der Wildschäden an der Verjüngung im österreichischen Wald im Rahmen der österreichischen Waldinventur. Berlin, Erich Schmidt Verlag, 187 S.
- Schönenberger W, Brang P. 2004. Silviculture in mountain forests. In: Burley J, Evans J (eds.): Encyclopedia of forest sciences. Amsterdam, Elsevier: 1085-1094.
- Schönenberger W, Brang P. 2006. Wiederbewaldung von "Vivian"-Windwurfflächen im Gebirgswald. Wald Holz 87(7): 38-41.
- Schweizerische Gebirgswaldpflegegruppe. 2004. Dokumentation der 20. Arbeitstagung der Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe GWG. Einfluss der Eingriffstärke im Schutzwald auf die Waldentwicklung und die Kosten der Holzernte. 16.-18. August 2004, Tessin.
- 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.
- Utschig 2002. Analyse der Standraumökonomie von Einzelbäumen auf langfristig beobachteten Versuchsflächen - Methoden, Programmentwicklung und erste Ergebnisse. Forstwiss Cbl 121: 335-348.
- Wallentin C, Nilsson U. 2011. Initial effect of thinning on stand gross stem-volume production in a 33-year-old Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand in Southern Sweden. Scand J For Res 26 (Suppl 11): 21-35.
- Wehrli A, Weisberg PJ, Schönenberger W, Brang P, Bugman H. 2007. Improving the establishment submodel of a forest patch model to assess the long-term protective effect of mountain forests. Eur J For Res 126(1): 131-145.
- Wenk G, Antanaitis V, Šmelko Š. 1990. Waldertragslehre. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 448 S.
- Wiedemann E. 1937. Die Fichte. Schaper Verlag, Hannover.
- Wunder J, Brang P. 2003. Fichtenverjüngung im Gebirgswald: Erfolgskontrolle in Schlitzen. Informationsblatt Forschungsbereich Wald 13: 1-3.
- Wunder J, Bigler C, Reineking B, Fahse L, Bugmann H. 2006. Optimisation of tree mortality models based on growth patterns. Ecol Model 197: 196-206.
- Zimmermann S, Wunder J, Brang P. 2011. Erfolgskontrolle in Verjüngungsschlitzen. Bündnerwald 64(1): 46-49.

Zingg A, Bürgi A. 2008. Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen. Schweiz Z Forstwes 159(10): 352-361.

Zingg A, Frutig F, Bürgi A, Lemm R, Erni V, Bachofen H. 2009. Ertragskundliche Leistung in den Plenterwald-Versuchsflächen der Schweiz. Schweiz Z Forstwes 160(6): 162-174.

Zingg A. 1996. Diameter and basal area increment in permanent growth and yield plots in Switzerland. Europ For Inst Res Rep 5: 239-265.

9 Im Projekt erarbeitete Publikationen

Nikolova P, Vitali V, Cherubini P, Zingg A, Brang P. 2016. Radialzuwachs von Fichten im Randbereich grosser Verjüngungsöffnungen: ein Beispiel aus den Schweizerischen Alpen. In: Kohnle U, Klädtke J (Hrsg.) Tagungsband 2016. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde. Jahrestagung 09.-11.05.2016, Lyss / Kanton Bern, Schweiz. Freiburg i.Br., Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg. SS. 150-157.

Vitali V, Brang P, Cherubini P, Zingg A, Nikolova PS. 2016. Radial growth changes in Norway spruce montane and subalpine forests after strip cutting in the Swiss Alps. For Ecol Manage 364: 145-153.