

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 147 (1996)

Heft: 10

Artikel: Ansamungsgunst und Verteilung der Direktstrahlung in schlitzförmigen Bestandesöffnungen zwischenalpiner Fichtenwälder

Autor: Brang, Peter

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-767063>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 19.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen

Journal forestier suisse

147. Jahrgang

Oktober 1996

Nummer 10

Ansamungsgunst und Verteilung der Direktstrahlung in schlitzförmigen Bestandesöffnungen zwischenalpiner Fichtenwälder

Von Peter Brang

Keywords: Natural regeneration; *Picea abies*; direct radiation; protective forests; Swiss Alps; selection cutting.

FDK 181.21: 231.3: 174.7 *Picea*: (23)

1. Einführung

Das Wurzelwachstum von Fichtensämlingen (*Picea abies* (L.) Karst.) beginnt bei etwa 2 bis 4 °C, steigt ab 8 °C linear bis 26 °C an, um darüber wieder abzufallen (*Ladefoged*, 1939; *Tranquillini*, 1979; *Turner* und *Streule*, 1983; *Bartsch*, 1985). Der optimale Bereich für das Wurzelwachstum wird im Oberboden von Gebirgswäldern in der Vegetationsperiode bei weitem nicht erreicht; an einem nordnordwest-exponierten Steilhang der subalpinen¹ Stufe lagen die Durchschnittstemperaturen im Oberboden im Sommer beispielsweise unter 11 °C (*Imbeck* und *Ott*, 1987). Die Wärme im Wurzelraum ist somit in Hochlagen ein Minimumfaktor für Überleben und Wachstum der Verjüngung von Fichte (*Imbeck* und *Ott*, 1987; *Frehner*, 1989; *Lüscher*, 1990; *Brang*, 1996) und auch von anderen Nadelbäumen (*Day et al.*, 1989; *Coates et al.*, 1991).

Die Wärme im Wurzelraum, die für die Verjüngung in der subalpinen Stufe während der Vegetationsperiode so unentbehrlich ist, hängt eng mit der direkten Sonneneinstrahlung zusammen. Diffuses Licht kann die direkte Sonneneinstrahlung nicht ersetzen. Die Wärmeenergie, die durch direkte Sonneneinstrahlung zum Boden gelangt, ist stark von der potentiellen Sonnenschein-dauer abhängig, der Dauer also, während der die Sonne bei wolkenfreiem Himmel scheinen würde. Das Wachstum von Fichtensämlingen lässt sich daher mit der effektiv eingestrahlten Energie (mit Berücksichtigung der

¹ Höhenstufengliederung nach *Frey* (1995).

Bewölkung) nur leicht besser voraussagen als mit der potentiellen Sonnenscheindauer (ohne Berücksichtigung der Bewölkung) (Imbeck und Ott, 1987; Brang, 1996). Die potentielle Sonnenscheindauer hat dabei den Vorteil, dass sie sehr anschaulich ist und mit dem Horizontoskop (Tonne, 1954; Schütz und Brang, 1995) leicht im Gelände bestimmt werden kann.

Junge Fichten haben im hochmontanen und subalpinen Gebirgswald in Nordexposition nur auf Kleinstandorten mit mindestens anderthalb Stunden potentieller täglicher Sonnenscheindauer im Hochsommer eine Entwicklungschance (Imbeck und Ott, 1987; Frehner, 1989; Brang, 1996); in Südexposition ist in den ersten Lebensjahren rund eine halbe Stunde nötig (Brang, 1996).

In geschlossenen, einschichtigen Fichtenbeständen, die in den schweizerischen Alpen weit verbreitet sind, werden anderthalb Stunden Sonnenscheindauer nur selten erreicht. Es liegt daher nahe, mit waldbaulichen Mitteln den Anteil solcher Kleinstandorte zu erhöhen. Trepp (1955) schlug schon vor Jahrzehnten vor, an Steilhängen in feuchteren Fichtenwaldgesellschaften schlitzförmige, schräg zur Hangfalllinie liegende Bestandesöffnungen (im folgenden «Schlitze» genannt) anzulegen, um Sonnenlicht parallel zur Schlitzrichtung auf den Boden zu bringen. Dieses Vorgehen fand aber erst in den achtziger Jahren Verbreitung. Imbeck und Ott (1987) untersuchten die Ansamungsökologie der Fichte in solchen Schlitzen in der Alpendostflur mit Fichte (*Piceo-Adenostyletum*, Nr. 60 nach Ellenberg und Klötzli [EK], 1972).

Der vorliegende Aufsatz verfolgt drei Ziele. Erstens wird in geraffter Form der Kenntnisstand zur Ansamungsökologie der Fichte im zwischenalpinen Gebirgswald dargestellt (vgl. Brang, 1996). Der Begriff «zwischenalpin» bezeichnet eine Klimaregion, deren Klima zwischen dem ozeanischen Klima der nördlichen Randalpen und dem subkontinentalen der Zentralalpen steht (vgl. Wasser und Frehner, 1996). Zweitens wird die Direktstrahlungsverteilung im Tagesablauf in Schlitzen an einem Nordnordwesthang und in rundlichen Bestandesöffnungen an einem Südhang charakterisiert. Ausgehend davon wird drittens versucht, für andere Expositionen in den Zwischenalpen Zusammenhänge zwischen Form, Ausrichtung und Grösse von Bestandesöffnungen einerseits, Direktstrahlung und Ansamungsgunst für die Fichte andererseits abzuleiten.

2. Untersuchungsgebiet und Methodik

Die Untersuchung fand im hochmontanen bis subalpinen Schutzwald an zwei Steilhängen im Lehrrevier der ETH in Sedrun (Kanton Graubünden, Schweiz) statt. Das Untersuchungsgebiet in Sedrun liegt in den Zwischenalpen. Das Klima ist gemässigt ozeanisch geprägt (Gensler, 1978). Der Jahresniederschlag von gut 1200 mm ist über das ganze Jahr gut verteilt. Die winter-

lichen Schneehöhen liegen meist unter zwei Metern. Der Südhang ist 70 bis 90 % steil, der Nordnordwesthang 70 %. Als Böden haben sich Podsole und saure Braunerden herausgebildet; die Humusform liegt zwischen Moder (v.a. am Südhang) und Rohhumus (in beiden Expositionen). Pflanzensoziologisch liegt der Südhang vorwiegend im Ehrenpreis-Fichtenwald (*Veronica latifoliae-Piceetum*, EK Nr. 55), der Nordhang vorwiegend im Torfmoos-Fichtenwald mit Landschilf (*Sphagno-Piceetum calamagrostietosum villosae*, EK Nr. 57).

An beiden Hängen fand ein grosser Teil der Untersuchung in je sechs Bestandesöffnungen statt. Am Südhang waren diese Öffnungen rund bis rechteckig, parallel zur Niveaulinie 15 bis 30 m lang, senkrecht dazu 10 bis 20 m breit (jeweils von Kronenrand zu Kronenrand). Am Nordnordwesthang waren die gewählten Öffnungen schlitzförmig angelegt, mit einer Länge von 50 bis 70 m und einer Breite von 10 bis 15 m, und nach WNW bzw. ESE gerichtet. Die Öffnungen am Südhang waren zwischen 5 und 20 Jahre alt (Schätzung) und natürlichen Ursprungs, während die Schlitze am Nordnordwesthang 3 bis 4 Jahre vor Versuchsanlage (1987 und 1988) angelegt worden waren.

In diesen Bestandesöffnungen wurden in den Jahren 1991 und 1992 Saaten ausgeführt, die die natürliche Ansamung imitieren sollten. Das Schicksal der Saaten (Keimung, Mortalität, Wachstum) wurde über drei Jahre verfolgt. Gesät wurde auf einer gezielten Auswahl unterschiedlicher Kleinstandorte. Die gewählten Kleinstandorte deckten eine Kombination folgender Faktoren ab:

1. Höhenlage, zwischen 1550 und 1800 m ü. M.
2. Besonnung; sie variierte am Südhang zwischen 0 und 3 Stunden potentieller täglicher Sonnenscheindauer im Juni, am Nordnordwesthang zwischen 0 und 4½ Stunden. Die Saatstellen wurden mit Hilfe des sogenannten «Sonnenkompasses», eines Nachbaus des Horizontoskops (Tonne, 1954) ausgewählt.
3. Oberbodenart; ein Teil der Saatstellen lag auf der ungestörten Humusauflage, ein Teil in Kleinterrassen auf Mineralerde.
4. Vegetation; ein Teil der Saatstellen lag in dichter Vegetation, ein Teil auf vegetationsfreien Kleinstandorten.
5. Schirmeinfluss, indem Transekte vom Stammfuss von Lückenrandbäumen in die Bestandesöffnungen hinein angelegt wurden.

Zur Erfassung der Direktstrahlung wurden Fischaugenfotos verwendet. Am Nordnordwesthang wurden 75 Fotos ausgewertet (11 bis 14 pro Schlitz), am Südhang 73 (9 bis 14 pro Lücke). Die Himmelsbegrenzung wurde auf den Fischaugenfotos von Hand abgegrenzt, digitalisiert und rechnerisch mit den Sonnenbahnen geschnitten. Sonnenflecken unter rund fünf Minuten Dauer wurden nicht erfasst. Bei einer ersten Auswertung (Brang, 1996) wurde die Direktstrahlung pro Monat und Tageszeit aufsummiert, wobei zwischen den Tageszeiten Vormittag (Sonnenaufgang bis 10:59), Mittag (11:00 bis 13:59) und Nachmittag (14:00 bis Sonnenuntergang) unterschieden wurde. Der

Zusammenhang zwischen Ansamungsökologie und Direktstrahlung wurde dann bis zur Tageszeit verfolgt (Brang, 1996). Hier soll die Direktstrahlung detaillierter analysiert werden, indem eine Aufteilung auf die Tagesstunden (jeweils von x:00 bis x:59, x=8 ... 20) erfolgt.

Bei der Darstellung der Verteilung der Direktstrahlung im Tagesablauf wurde die anschauliche potentielle Sonnenscheindauer als Direktstrahlungsschätzung verwendet. Die potentielle tägliche Sonnenscheindauer im Juli (SSD07, Minuten · Tag⁻¹) ist durch folgende Beziehungen mit der effektiv täglich direkt eingestrahlten Energie im Juli 1991 (EN07, kJ · m⁻² · Tag⁻¹, Berechnung siehe Brang, 1996) verknüpft:

Südhang: EN07 = 16,4 + 31,5 · SSD07 (N=73, Bestimmtheitsmaß $r^2 = 0,93$)

Nordhang: EN07 = 195,9 + 11,8 · SSD07 (N=75, Bestimmtheitsmaß $r^2 = 0,71$)

Am Südhang ist diese Beziehung also viel straffer als am Nordhang, wo sich die Hangneigung der flachen Einfallswinkel der Sonne wegen stärker auf die direkt eingestrahlte Energie auswirkt.

Alle Zeiten wurden in Sommerzeit angegeben, welche der wahren Ortszeit (nach Sonnenstand) in Sedrun um 1 h 25' vorgeht (13.00 Uhr Sommerzeit = 11.35 Uhr Ortszeit in Sedrun). Ansamungsökologisch ist insbesondere die Direktstrahlung im Sommer wichtig. Daher wurde nur Direktstrahlung vom 1. Mai bis zum 30. September berücksichtigt. Weil sich die Sonnenflecken von Tag zu Tag nur geringfügig verschieben, wurde zudem nur die Häufigkeitsverteilung aller Sonnenflecken im Tagesablauf an sechs Tagen in dreissigtägigem Abstand dargestellt.

Wie repräsentativ sind die Saatstellen, an denen die Direktstrahlung erfasst wurde, für die Bestandesöffnungen? Ziel der Untersuchung in Sedrun war nicht, die Direktstrahlungsverteilung in den Bestandesöffnungen zu erfassen. Die Saatstellen waren daher nicht zufällig verteilt, sondern wurden gezielt so ausgewählt, dass sie den gesamten Gradienten der potentiellen täglichen Sonnenscheindauer im Juni innerhalb der Lücken ausserhalb des Bestandesschirms der Randbäume abdecken; sie reichen also von den am stärksten beschatteten Kleinstandorten zu den am meisten besonnten. Die erfassten Kleinstandorte sind damit im statistischen Sinn nicht repräsentativ. Es ist aber nicht zu erwarten, dass sich bei einer zufälligen Auswahl der Messstellen eine wesentlich andere Direktstrahlungsverteilung ergibt, weil die Messstellen weit gestreut die Bestandesöffnungen abdeckten.

Saatstellen mit sehr wenig Direktstrahlung (unter 20 Minuten potentieller täglicher Sonnenscheindauer im Juni) waren allerdings am Nordnordwesthang kaum zu finden, weil die Schlitze gegen Abend abgesehen von ihrem unteren Ende fast vollständig bestrahlt werden. Solche Saatstellen wurden daher teilweise in bergseitigen Ausbuchtungen der Schlitze im angrenzenden Bestand festgelegt. Im Vergleich zu einer zufälligen Auswahl von Kleinstand-

orten innerhalb der Schlitze sind daher Saatstellen mit sehr wenig Direktradiation am Nordnordwesthang leicht übervertreten.

In den untersuchten Schlitzen werden potentielle tägliche Sonnenscheindauern im Juni von acht Stunden wie in der Untersuchung von *Imbeck* und *Ott* (1987) im Lusiwald bei Davos/Graubünden nicht erreicht, weil in Sedrun die 1987/1988 angelegten Schlitze leicht schmäler sind und Messstellen unter Schirm nicht berücksichtigt wurden.

3. Ansamungsökologie der Fichte in kleinen Bestandeslücken im zwischenalpinen Gebirgswald

Auf die Ansamungsökologie der Fichte im zwischenalpinen Gebirgswald wird hier nur kurz eingegangen, indem die wesentlichen Resultate aus der Arbeit von *Brang* (1996) zusammengefasst werden. Der interessierte Leser sei auf die ausführlichere Darstellung mit vielen weiteren Literaturbelegen in *Brang* (1996) verwiesen.

Am *Südhang* ist in erster Linie Trockenheit limitierend für die Ansamung der Fichte. Problematisch ist die Keimphase zu dem Zeitpunkt, an dem die Keimwurzel die Samenschale durchbricht (*Rohmeder*, 1951). Dann ist das Keimsubstrat auf besonnten Kleinstandorten vielfach zu trocken, die Luft zu trocken (*Gregori*, 1967) und auf Humusaufklage die Oberflächentemperatur zu hoch. Wenige Wochen alte Keimlinge und Sämlinge hingegen ertragen Trockenheit in den kleinen Bestandeslücken. Dies gilt auch für die wenigen Sämlinge, die die Keimphase auf gutbesonnter Humusaufklage überlebt haben. Unter Schirm ist es generell zu trocken für Fichtenansamung. Dichte Vegetation ist ansamungsfeindlich. Mineralerde ist im Vergleich zur Humusaufklage viel ansamungsgünstiger, vor allem auf besonnten Kleinstandorten. Auf Humusaufklage fördert die potentielle tägliche Sonnenscheindauer im Juli im Bereich unter etwa einer halben Stunde das Höhenwachstum angewachsener, bis drei Jahre alter Sämlinge; auf Kleinstandorten mit längerer Besonnung steigt das Höhenwachstum aber nicht weiter an. Auf Mineralerde ist der Zusammenhang zwischen Höhenwachstum der Sämlinge und Direktstrahlung ähnlich; das maximale Höhenwachstum wird aber erst bei einer potentiellen täglichen Sonnenscheindauer im Juli von etwa einer Stunde erreicht.

Am *Nordnordwesthang* ist es für die Fichtenansamung nur unter dichtem Schirm von Lückenrandbäumen zu trocken; im Kronenrandbereich und unter lockerem Schirm ist aber bereits Ansamung möglich. Hingegen ist es für die Fichtenansamung ohne direkte Sonneneinstrahlung zu kühl. Das gilt noch nicht für die Keimung, die fast flächig gelingt, aber für das folgende Sämlingsstadium. Das «Existenzminimum» eines Fichtensämlings liegt bei etwa anderthalb Stunden potentieller täglicher Sonnenscheindauer im Juli, womit frühere

Resultate bestätigt werden (Imbeck und Ott, 1987; Frehner, 1989). Zunehmende Direktstrahlung fördert Überleben, Spross- und Wurzelwachstum von Fichtensämlingen entscheidend. Bei längeren potentiellen täglichen Sonnenscheindauern im Juli als etwa zweieinhalb Stunden nimmt das Wachstum bis dreijähriger Fichtensämlinge in Sedrun allerdings kaum mehr zu, sehr wahrscheinlich weil dann in den schmalen Schlitzen der Anteil der relativ energiearmen Abendsonne stark ansteigt. In dichter Vegetation haben Fichtenkeimlinge nur eine minime Entwicklungschance, weil die Vegetation die Erwärmung des Bodens behindert (Ott et al., 1991) und weil sie die Keimlinge über Winter mit Streu begräbt. Mineralerde ist für die Keimung günstiger als Humusaufgabe, obwohl die Keimlinge auf Mineralerde zuweilen durch Erosion entwurzelt oder durch Barfrost gehoben werden.

Innerhalb der Bestandesöffnungen sind die kleinstandörtlichen Unterschiede in beiden Expositionen sehr gross, z.B. bezüglich Direktstrahlung, Niederschlag, Dauer der permanenten Schneedeckung, Vegetationsdeckung und Kleintopographie im Dezimeter-Bereich. Das Kleinstandortspektrum reicht von ansamungsgünstigen Kleinstandorten zu dauernd baumfeindlichen (Bischoff, 1987; Bernier und Ponge, 1994).

Die ansamungökologischen Unterschiede zwischen Südhang und Nordnordwesthang sind mindestens so gross wie diejenigen zwischen verschiedenen Klimaregionen, z.B. den nördlichen Randalpen und den Zentralalpen. Dies beruht auf den enormen Direktstrahlungsunterschieden zwischen den beiden extremen Expositionen. Diese Unterschiede bewirken unter anderem, dass der Oberboden am Südhang im Sommer tagsüber durchschnittlich um rund 2 bis 3 °C wärmer (vgl. Mettin, 1977) und dass hier die Verdunstung des vegetationsfreien Bodens rund doppelt so gross ist wie am Nordnordwesthang (Brang, 1996).

Hinzuzufügen ist, dass die natürliche Walddynamik an beiden Hängen seit Jahrhunderten vom Menschen beeinflusst wird. Die intensive Holznutzung liess den Wald an Moderholz und damit an einem ansamungökologisch wichtigen Kleinstandort verarmen. Die frühere intensive Ziegenweide und die heutigen überhöhten Wildbestände haben die Vogelbeere (*Sorbus aucuparia* L.) beinahe verschwinden lassen. Es besteht Grund zur Annahme, dass die Vogelbeere die Entwicklung der Bodenvegetation hemmt, das Aufwachsen der Fichte aber erlaubt (Furrer, 1994). Das Fehlen von Moderholz und der Vogelbeere erschwert die natürliche Verjüngung der Fichte beträchtlich (Ott, 1995).

4. Verteilung der Sonnenflecken in kleinen Bestandeslücken im Tagesablauf

4.1 Sonnenflecken am Südhang

In jeder Stunde ist mindestens die Hälfte der Sonnenflecken kürzer als etwa 25 Minuten (*Abbildung 1a*); im Tagesablauf sind nur geringe Verschiebungen des Medians der Sonnenfleckendauer festzustellen. Längere Sonnenflecken beginnen um die Mittagszeit und von 17 bis 19 Uhr, wobei letzteres nicht häufig vorkommt und daherröhrt, dass eine der sechs Lücken zur Abendsonne hin geöffnet ist. Die Häufigkeitsverteilung des Beginns der Sonnenflecken ist klar eingipflig, mit einem Maximum von 11 bis 16 Uhr. Wenn gut und schlecht besonnte Saatstellen getrennt werden, wird klar, wann gut besonnte Saatstellen die meisten und längsten Sonnenflecken erhalten, nämlich um die Mittagszeit (*Abbildung 1b*). Schlecht besonnte Saatstellen hingegen zeigen eine recht gleichmässige Verteilung der Sonnenflecken im Tagesablauf (*Abbildung 1c*).

Dass die Dauer der Sonnenflecken im Tagesablauf und ihre Häufigkeit von 11 bis 16 Uhr nicht stärker schwanken (*Abbildung 1a*), beruht darauf, dass hier verschiedene Lücken gleichzeitig betrachtet werden. Die Lücken unterscheiden sich bezüglich Sonnenfleckendauer im Tagesablauf stark (*Brang, 1996*), weil die Lückenrandbäume in jeder Lücke unterschiedlich verteilt und unterschiedlich hoch sind und ihre Kronenformen und Transparenz variieren. All dies wiederum bestimmt den Schattenwurf der Randbäume und damit die Sonnenfleckendauer. Bei einer gemeinsamen Betrachtung von sechs Lücken wie hier werden diese Unterschiede verdeckt. Aus den Unterschieden zwischen den Lücken in der Sonnenfleckendauer im Tagesablauf lässt sich ableiten, dass es möglich ist, beim Anlegen von Lücken die Sonnenfleckendauer gezielt zu beeinflussen.

4.2 Sonnenflecken am Nordnordwesthang

Am Nordnordwesthang sind die Bestandesöffnungen schlitzförmig und gerichtet; die Schlitzachsen verlaufen in Richtung 280 bis 290 Altgrad (etwa ESE-WNW). Mit Ausnahme der Zeit von 17 bis 20 Uhr ist mindestens die Hälfte der Sonnenflecken zu jeder Tagesstunde kürzer als etwa 20 Minuten (*Abbildung 2a*). Längere Sonnenflecken von über 30 Minuten Dauer treten gehäuft von 17 bis 20 Uhr auf. Mittags sind die Sonnenflecken nur kurz. Würde die Sonne vor allem parallel zur Schlitzrichtung den Boden erreichen, wären Spitzen der Besonnung von etwa 9:30 bis 11:30 Uhr und von 19 bis 21 Uhr (Sommerzeit) zu erwarten. Dies trifft nur im zweiten Fall annähernd zu; hier beginnen die meisten Sonnenflecken aber etwas früher. Das ist darin begrün-

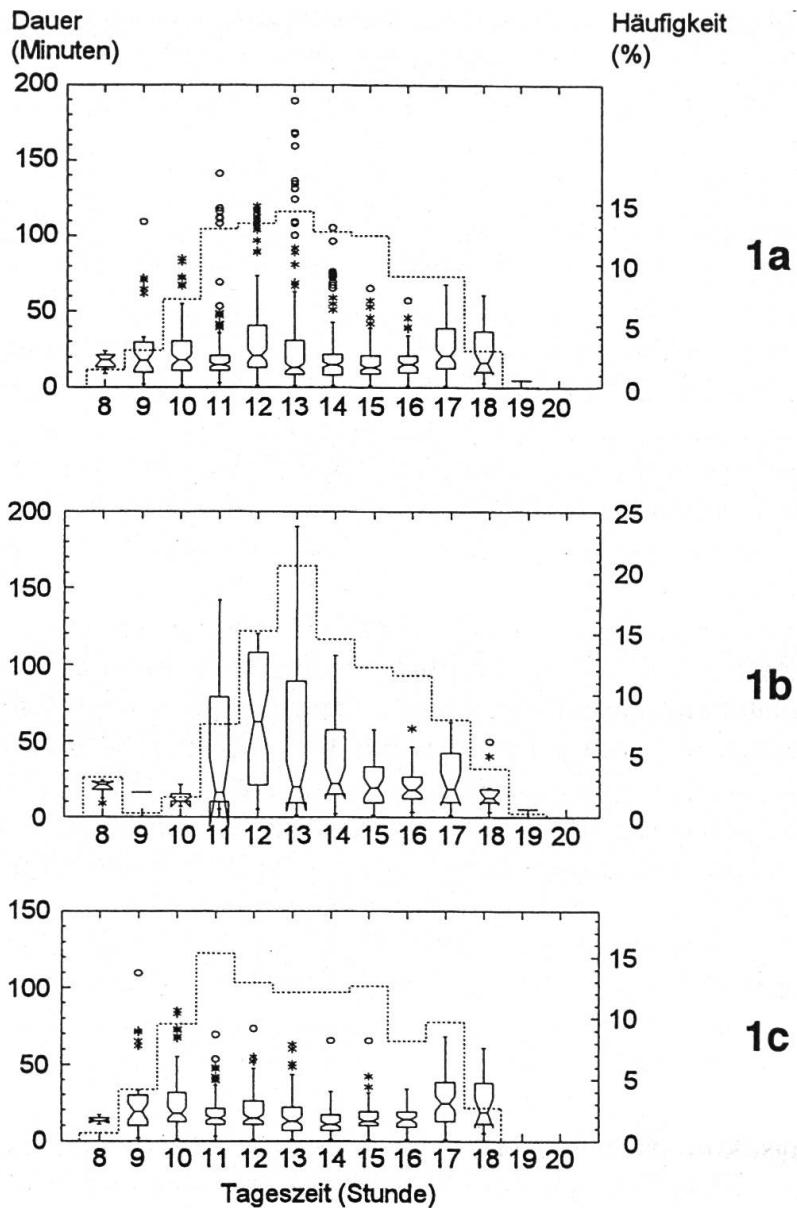


Abbildung 1. Beginn, Dauer und relative Häufigkeit von Sonnenflecken (SF) im Tagesablauf auf 73 Saatstellen am Südhang am 1. Mai, 31. Mai, 30. Juni, 30. Juli, 29. August und 28. September. – SF kürzer als etwa 5 Minuten und Bewölkung sind nicht berücksichtigt. Die Saatstellen decken den Gradienten der Besonnung in sechs Lücken ab, sind aber nicht im statistischen Sinn repräsentativ verteilt. Die Tageszeit gibt den Beginn der SF an. Die Werte der Stunde x gelten dabei jeweils für die Zeit von x:00 bis x:59 (14 heisst z. B. 14:00 bis 14:59), und zwar in Sommerzeit, die der wahren Ortszeit um rund 90 Minuten vorgeht. Jede Saatstelle ist somit mehrfach vertreten (an verschiedenen Daten, zum Teil auch zu unterschiedlichen Tageszeiten). Ausreisser (mit * und ° angedeutet) sind hier als extreme, aber durchaus zum Direktstrahlungsspektrum der SF in den Bestandeslücken gehörende Werte zu betrachten. Die Tagessumme der relativen Häufigkeiten, die als gestrichelte Linie angegeben sind, ist 100 %. Die gekerbten Boxplots sind wie folgt zu lesen (SYSTAT, 1992): Die waagrechte Linie in der Mitte einer Box ist der Median. Der obere und der untere Rand einer Box stellen das obere und untere Quartil dar, sie umfassen also die Hälfte aller Werte. Die Kerben umfassen ein 95 % Vertrauensintervall des Medians. * und ° stehen für Datenwerte, die das obere Quartil um 150 bis 300 % (*) oder um mehr als 300 % (°) der Interquartilsdifferenz überschreiten.

distanz (oberes minus unteres Quartil) überschreiten bzw. das untere Quartil entsprechend unterschreiten. In den ersten und letzten Tagesstunden steht ein Boxplot z.T. für unter zehn Werte.

- 1a: Alle 73 Saatstellen mit total 1044 SF (2,4 SF pro Tag und Saatstelle).
 - 1b: 18 Saatstellen mit mindestens 90 Minuten potentieller täglicher Sonnenscheindauer im Juli, mit total 300 SF (2,8 SF pro Tag und Saatstelle).
 - 1c: 55 restliche Saatstellen mit höchstens 89 Minuten potentieller täglicher Sonnenscheindauer im Juli, mit total 744 SF (2,3 SF pro Tag und Saatstelle).
-

det, dass die Sonne dann den talseitigen Rand der Schlüsse bereits flächig bestreicht; später ist nicht mehr der bergseitige Bestandesrand der Schlüsse schattengebend, sondern die Bergkette, hinter der die Sonne untergeht. Am meisten Sonnenflecken treten kurz nach Mittag zur Zeit des höchsten Sonnenstandes auf (*Abbildung 2a*).

Gut besonnte Saatstellen werden vor allem am späteren Nachmittag und frühen Abend länger bestrahlt (*Abbildung 2b*); dasselbe gilt weit weniger deutlich für mäßig besonnte (*Abbildung 2c*, 19 Uhr). Hier sind aber bereits Sonnenflecken zur Mittagszeit häufiger (wenn auch eher kurz). Schlecht besonnte Saatstellen, die nahe des bergseitigen Schlitzrandes liegen, weisen die längsten Sonnenflecken dann auf, wenn die Sonne parallel zur Schlitzrichtung verläuft (*Abbildung 2d*), nach 10 Uhr und nach 19 Uhr. Am häufigsten treten allerdings Sonnenflecken zur Mittagszeit auf. Aus den Angaben zur Anzahl der Sonnenflecken in *Abbildung 2* geht auch hervor, dass gut und mäßig besonnte Saatstellen (*Abbildungen 2b* und *2c*) gegenüber schlecht besonnten (*Abbildung 2d*) sowohl von längeren als auch zahlreicher Sonnenflecken bestrahlt werden.

5. Ansamungsökologische Optimierung von Form, Ausrichtung und Grösse von Bestandesöffnungen am Südhang und am Nordnordwesthang

5.1 Bestandesöffnungen am Südhang

Am Südhang ist Ansamung viel schwieriger zu erhalten als am Nordnordwesthang. Die Bedürfnisse der Sämlinge lassen sich nur schwer erfüllen, weil gleichzeitig mäßig viel Direktstrahlung und möglichst viel Niederschlag gefordert sind. Die potentielle Sonnenscheindauer auf bestbesonnten Kleinstandorten ist in den kleinen Bestandesöffnungen am Südhang zwar wesentlich kürzer als in den langgezogenen Schlüßen am Nordnordwesthang; die eingestrahlte Energie ist aber etwa gleich gross (Brang, 1996). Wie Niederschlagsmessungen zeigen, bewirkt die Abschirmung durch Lückenrandbäume, dass der Freilandniederschlag in drei der sechs untersuchten Bestandesöffnungen überall unterschritten wird. Kleinere Lücken kommen somit am Südhang, wo

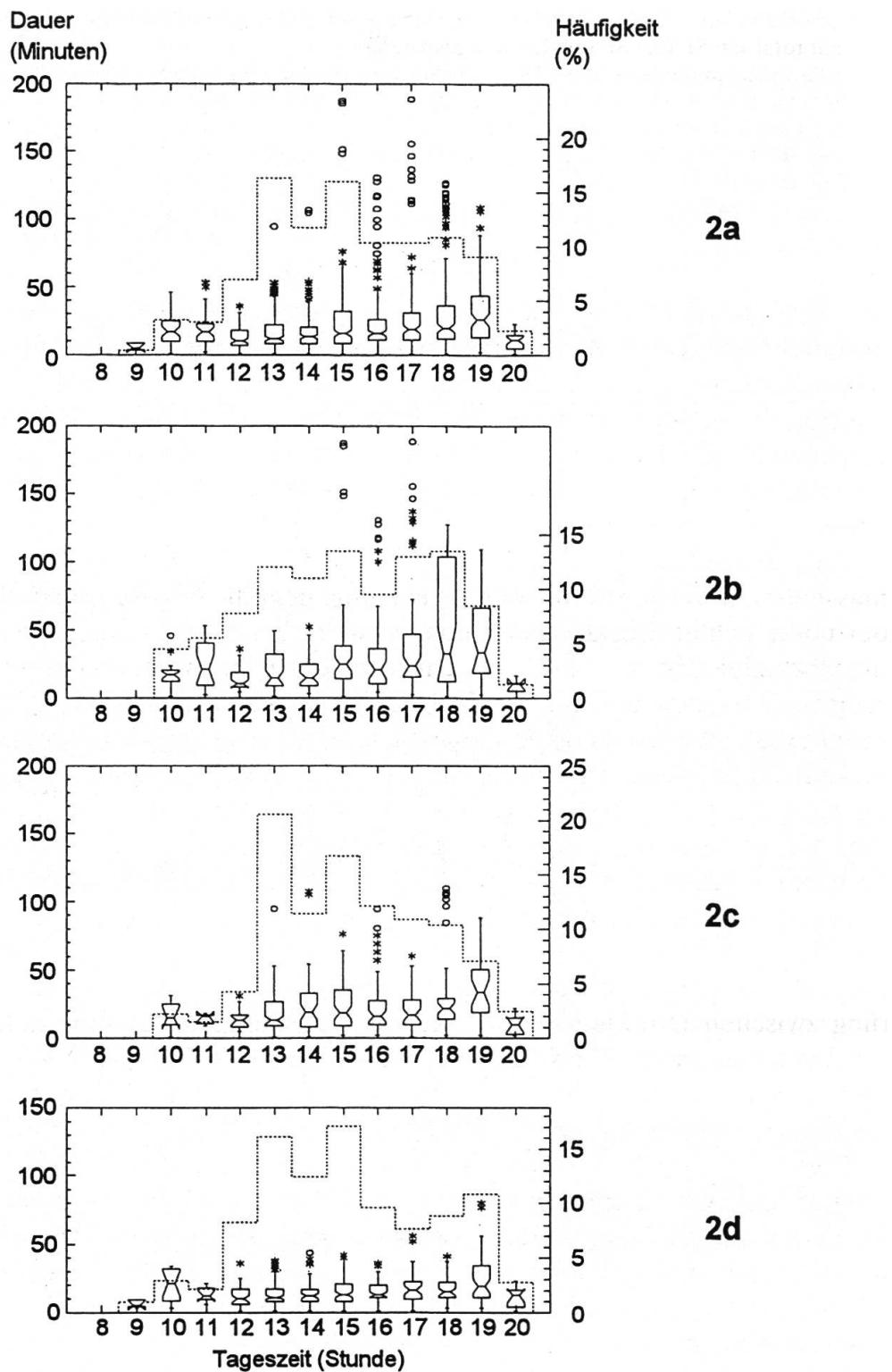


Abbildung 2. Beginn, Dauer und relative Häufigkeit von Sonnenflecken (SF) im Tagesablauf auf 75 Saatstellen am Nordhang am 1. Mai, 31. Mai, 30. Juni, 30. Juli, 29. August und 28. September.
– Erläuterungen siehe Abbildung 1.

2a: Alle 75 Saatstellen mit total 1300 SF (2,9 SF pro Tag und Saatstelle).

-
- 2b: 19 Saatstellen mit mindestens 150 Minuten potentieller täglicher Sonnenscheindauer im Juli, mit total 400 SF (3,5 SF pro Tag und Saatstelle).
 - 2c: 18 Saatstellen mit zwischen 90 und 149 Minuten potentieller täglicher Sonnenscheindauer im Juli, mit total 394 SF (3,6 SF pro Tag und Saatstelle).
 - 2d: 38 restliche Saatstellen mit höchstens 89 Minuten potentieller täglicher Sonnenscheindauer im Juli, mit total 506 SF (2,2 SF pro Tag und Saatstelle).
-

Trockenheit die Fichtenansamung gefährdet, nicht in Frage. Werden die Bestandesöffnungen grösser angelegt als die hier untersuchten, trifft zwar mehr Niederschlag, aber auch mehr Direktstrahlung ein, womit auf einem zunehmend grösseren Flächenanteil die Ansamung unwahrscheinlich wird. Zudem wird durch grössere Bestandesöffnungen das Schneegleiten gefördert, das an einem vergleichbaren Hang bei Disentis/Graubünden den Fichtenaufwuchs gefährdet (*Kreiliger, 1994*).

Für Naturverjüngung auf Humusaufklage, also ohne Verjüngungs-Hilfsmassnahmen wie Schürfung oder Pflanzung, liegt die Grösse (nicht die Form) der untersuchten Bestandesöffnungen mit 15 bis 30 m Durchmesser höhenlinienparallel und 10 bis 20 m senkrecht dazu im optimalen Bereich. Die sicherste Methode, am Südhang Fichtenansamung zu erhalten, besteht aber im Freilegen der Mineralerde. Auf Mineralerde ertragen keimende Samen, Keimlinge und Sämlinge auch hohe Direktstrahlung und mässige Interzeption.

Das Anlegen schlitzförmiger Bestandesöffnungen am Südhang parallel zur Hauptwindrichtung (Westen) verspricht am meisten Niederschlag auf dem Waldboden. In west-ost-gerichteten Schlitzen ist aber vermutlich auch mit erhöhter Sturmgefährdung zu rechnen, besonders bei langen Schlitzen. Entsprechende Untersuchungen in rottig strukturierten Beständen fehlen allerdings (*Savill, 1983*). Im Sinne eines vorsichtigen Vorgehens und einer Optimierung zwischen Direktstrahlung, Niederschlagsmenge und Sturmgefährdung werden am Südhang 30 bis 50 m lange und 10 bis 15 m breite, west-ost-gerichtete Schlitze vorgeschlagen. Denkbar ist auch eine leichte Hinwendung der Schlitze zur Morgensonne (WNW-ESE), um so möglichst viel Niederschlag auf den bergseitigen, am stärksten besonnten Bestandesrand zu lenken. Der ansamungsfeindlichen Mittagssonne ist durch talseits dicht stehende, hohe Bäume so weit als möglich der Zutritt zu verwehren – in dieser Hinsicht waren die untersuchten sechs Bestandesöffnungen nicht optimal (*Abbildung 1a*) –, und bergseits sollten keine talwärts geneigten Bäume den knappen Niederschlag abfangen.

Schlitze können allgemein so ausgerichtet werden, dass die am stärksten besonnten Bestandesränder auch viel Niederschlag erhalten. Dies verspricht günstigere ansamungsökologische Bedingungen als in Fällen, in denen die bestbesonnten Kleinstandorte im Regenschatten liegen. Dieser Grundsatz ist nicht auf trockene Südhänge beschränkt; in Ost-, West- und Nord-Exposition

lässt sich so leichter Verjüngung unter dem Schirm der Lückenrandbäume erhalten. Auch wenn dies nicht jedes Jahr funktioniert, weil die Niederschlagsverteilung witterungsabhängig ist, so wird doch damit eine erfolgreiche Ansamung wahrscheinlicher. Es ist nicht zu befürchten, dass gut besonnte Regen-Luvlagen im Frühjahr zu Schnee-Luvlagen werden. Solche Kleinstandorte apern im Frühjahr relativ früh aus (Imbeck und Ott, 1987).

Die ansamungsökologisch günstige Faktorenkombination «gut besonnte Regen-Luvlage» tritt in allen NW-SE- und WNW-ESE-gerichteten Schlitzen ein (und in NNW-SSE-gerichteten Schlitzen, wo aber in der Mittagszeit für Fichtenansamung zu hohe Direktstrahlung eintrifft). Solche Schlitze sind dort nicht anwendbar, wo sie in einem spitzen Winkel zur Hangfalllinie liegen (z.B. in Nordwest-Exposition).

5.2 Bestandesöffnungen am Nordnordwesthang

Aus einer Verteilung der Sonnenflecken im Tagesablauf in Schlitzen am Nordnordwesthang wie in *Abbildung 2a* die Schlitzrichtung ablesen zu wollen, ist schwierig. Das heisst keineswegs, dass die Schlitze unwirksam sind; ihre Ränder «funktionieren» aber nicht so einfach wie eine Betonmauer. Die Bäume sind in hochmontanen und subalpinen Fichtenwäldern in der Regel klumpig verteilt. Dies führt dazu, dass sich im Lückenrand strahlungsmässig weitgehend undurchlässige «Wände» mit durchlässigen «Fenstern» abwechseln. Ohne diese «Fenster» erreicht Direktstrahlung, die mehr oder weniger senkrecht zur Schlitzrichtung eintrifft, die Bodenoberfläche in Schlitzen nicht. Dazu sind die Schlitze zu schmal, die Bäume zu hoch, und der Einfallswinkel der Sonne (auch bei Sonnenhöchststand) zu flach. Die talseitigen Bestandestränder der Schlitze werden somit nicht über die bergseitigen Randbäume hinweg bestrahlt. Mit zunehmender Höhenlage sind Fichtenbestände zunehmend rottig strukturiert, womit die strahlungsmässige Bedeutung der «Fenster» zunimmt. Dieser «Fenster» wegen bestrahlt die Sonne die Schlitze auch dann, wenn sie nicht parallel zur Schlitzachse steht. Dieser «Nebeneffekt» der Schlitze ist strahlungsmässig vermutlich besonders dann bedeutend, wenn sie annähernd west-ost-gerichtet sind, so dass die Sonne mittags senkrecht zur Schlitzrichtung einstrahlen kann. Es kann also grob unterschieden werden zwischen Direktstrahlung, die mehr oder weniger parallel zur Schlitzrichtung eintrifft, und Direktstrahlung, die mehr oder weniger senkrecht dazu eintrifft.

Obwohl die Schlitze am Nordnordwesthang in Sedrun zur Nachmittagssonne gerichtet sind und die potentielle Sonnenscheindauer daher nachmittags am längsten ist, wird mittags zur Zeit des höchsten Sonnenstandes am meisten Energie eingestrahlt (Brang, 1996). Mittagssonne ist «effizienter», weil ihr Einfallswinkel steiler ist und sie daher am wenigsten durch die Atmosphäre abgeschwächt wird. Auf Kleinstandorten mit viel Mittagssonne küm-

mert die Fichtenansamung bereits wieder, was am talseitigen Rand von Schlitzen in Nordnordwestexposition beobachtet wurde (Imbeck und Ott, 1987). Noch ausgeprägter zeigt sich dieses Phänomen am Südhang, wo Kleinstandorte mit viel Direktstrahlung mittags für Keimung und Wachstum von Fichtensämlingen ungünstig sind (Brang, 1996).

Am Nordnordwesthang wird auf der Hälfte der Saatstellen innerhalb der Schlitze im Juli eine potentielle Sonnenscheindauer von anderthalb Stunden täglich überschritten. Da die schlechtest besonnten Saatstellen am Lückenrand liegen, z.T. in Ausbuchtungen in den angrenzenden Bestand hinein, erhält eher noch etwas mehr als die Hälfte der Schlitzfläche ansamungsökologisch gesehen genügend Direktstrahlung. Die Schlitze haben also strahlungsmässig den gewünschten Effekt. Um sicher Ansamung zu erhalten, müssen nun noch weitere Voraussetzungen erfüllt sein, wie genügendes Samenangebot, genügend Kleinstandorte ohne dichte Vegetation, kein Mortalitätsverbiss und keine zu schneereichen Winter, die dem Schneeschimmel (*Herpotrichia juniperi* (Duby) Petrak) gute Entwicklungsmöglichkeiten bieten.

Erstaunlicherweise bewirkt bereits eine leichte Drehung der Hangexposition von Nord nach Nordnordwest wie in Sedrun, dass die Sonne die ESE-WNW-gerichteten Schlitze vormittags kaum parallel zur Schlitzrichtung bestrahlt. Geringfügige Änderungen der Exposition können also die Direktstrahlung in kleinen Bestandesöffnungen stark beeinflussen.

Für Schlitze, die nicht direkt zur Mittagssonne gerichtet sind, ist die Ausrichtung der Schlitzachse strahlungsmässig nicht entscheidend. Wichtiger als die Ausrichtung eines Schlitzes ist die Tatsache, dass er vorhanden ist. Die Sonnenstrahlen finden ihren Weg in den Schlitz in rottig strukturierten Beständen auf jeden Fall. Damit können und müssen beim Anlegen von Schlitzen andere Kriterien berücksichtigt werden, wie die Stabilität potentieller Randbäume, die Beeinflussung der Interzeption und der Schneeeablagerung, die räumliche Verteilung und Dichte der Vegetation sowie holzerne-technische Gesichtspunkte. Am Nordnordwesthang sind damit z.B. auch ENE-WSW-gerichtete Schlitze denkbar. Es ergaben sich zwar Hinweise, dass Nachmittagssonne für die Fichtenansamung besonders günstig ist (Brang, 1996); für eine Verallgemeinerung dieses Befunds fehlt aber vorderhand die Grundlage.

Der Direktstrahlungsgenuss ist auf ebenen oder nach Süden gerichteten Kleinstandorten am Nordnordwesthang massiv grösser als auf hangparallelen. Auf ebenen Flächen war in Sedrun bei gleicher Sonnenscheindauer die eingeschaltete Energie durchschnittlich um rund 50 % höher als auf hangparallelen Kleinstandorten (Brang, 1996). Bei Gegensteigungen, wie sie für umgekippte Wurzelteller typisch sind, ist diese Energiedifferenz noch grösser. Gegensteigungen an einem Nordhang stellen somit kleine «Südhänge» dar, aber in einer generell feuchteren Umgebung und damit mit nur geringer Austrocknungsgefahr.

6. Grundsätze zur Ausformung von Bestandesöffnungen in hochmontanen und subalpinen Fichtenbeständen der Zwischenalpen

Bevor die am Südhang und Nordnordwesthang gewonnenen Erkenntnisse auf andere Expositionen übertragen werden, stellt sich die Frage, ob in anderer Exposition grundsätzlich andere Formen und Größen von Bestandesöffnungen in Frage kommen. Daher seien zunächst einige Grundsätze in Erinnerung gerufen, die, neben den oben erwähnten ökologischen Erfordernissen der Fichtenansammlung, die Ausformung von Bestandeslücken bestimmen.

1. Die *Stabilität des verbleibenden Bestandes* hat erste Priorität. Das heisst konkret, dass erstens Rotten nicht angeschnitten werden dürfen (Bischoff, 1987; Alexander, 1973); die Form der Bestandesöffnungen hat sich somit der Rottenverteilung im Bestand anzupassen. Ein schematisches Anzeichnen nach Schlitzlänge und -breite wäre ein schwerwiegender waldbaulicher Fehler. Zweitens dürfen die Öffnungen nicht zu gross gewählt werden, weil sich dadurch die Sturmgefährdung erhöht.
2. Das Fernziel *Gebirgsplenterung* ist im Auge zu behalten. Grosse Bestandesöffnungen führen fast zwangsläufig zu gleichförmigen Folgebeständen.
3. *Waldlawinen* sind zu verhindern. In steilem Gelände von etwa 35° Neigung ist ab einem Öffnungsdurchmesser von rund 50 m in der Falllinie (bei 45° von rund 30 m) und von mindestens 20 m parallel zur Höhenlinie mit dem Anriss von Lawinen zu rechnen (Wasser und Frehner, 1996; vgl. Meyer-Grass, 1985).
4. Die Bestandesöffnungen sollen keine «*Schneelöcher*» sein. In Öffnungen bildet sich eine höhere Schneedecke als im Bestand, was zu schneemechanischen Schäden führt (vor allem in Südexposition), zur Verkürzung der ohnehin schon knappen Vegetationszeit und zu erhöhten Schneeschirmschäden. Dies spricht für kleine Bestandesöffnungen, die die unter Punkt 3 genannten Ausmasse von 6 bis 10 Aren eher noch unterschreiten oder dann lang und schmal sind.
5. Eine verjüngungsverdämmende *Vegetationsentwicklung* ist zu verhindern oder zu verzögern. In zu kleinen und in zu grossen Bestandesöffnungen ist die Vegetation konkurrenzkräftiger als die Fichtenansammlung. Am Südhang in Sedrun ist zu beobachten, dass sich die Vegetation in Öffnungen von mehr als etwa fünf Aren Flächengrösse wesentlich rascher und üppiger entwickelt als in kleineren.
6. *Bestehende Verjüngungsansätze* haben Priorität vor neuen. Das Risiko, eine Verjüngung wieder zu verlieren, sinkt mit zunehmender Entwicklung des Nachwuchses. In diesem Sinn sind bestehende Verjüngungsansätze eine sicherere «*Anlage*» als noch nicht vorhandene.
7. *Kleinstandörtlichen Unterschieden innerhalb der Bestandeslücken*, z.B. zwischen talseitigem und bergseitigem Lückenrand oder zwischen konkavem und konvexen Geländeformen, ist Rechnung zu tragen.

Nur kurzfristige wirtschaftliche Gründe sprechen für grössere Bestandesöffnungen; solche kommen aber in diesen empfindlichen Systemen aus ansamungsökologischen Gründen nicht in Frage. Ist das Gelände so flach, dass Lawinenanrisse nicht zu befürchten sind, sprechen immer noch die Grundsätze 2, 4 und 5 für kleine Bestandesöffnungen.

Die entscheidenden Witterungseinflüsse wie Direktstrahlung und Niederschlag (als Regen und als Schnee) sind gerichtet; sie wirken also nicht aus beliebigen Richtungen, sondern vorherrschend aus bestimmten. Mit Bestandesöffnungen, die ebenfalls gerichtet sind – wie Schlitzen – lassen sich die gerichteten Witterungseinflüsse daher gezielter und dosierter beeinflussen als mit weniger gerichteten Formen wie Kreisen, Ovalen oder Quadraten. Der Schlitz als Öffnungsform ist daher ein wirksames Mittel zur Beeinflussung des Mikroklimas.

Der Schlitz hat aber auch in Lawinenschutzwäldern Grenzen der Anwendung. Ist der Ausgangsbestand ausgeprägt rottig strukturiert oder verlichtet, so ist er schon so sehr von Direktstrahlung durchflutet, dass die Besonnung nicht mehr Minimumfaktor ist. Die Schaffung weiterer Öffnungen und damit auch von Schlitzen ist dann verfehlt. In den direktstrahlungsreichen Zentralalpen würden langgezogene Schlitze eher zu viel Besonnung bewirken. Dann sind kleinere Bestandesöffnungen angebracht (Bischoff, 1987; Lüscher, 1990).

Nicht entscheidend für die Ausformung von Bestandesöffnungen ist die Frage, wo sich die Verjüngung schliesslich einstellt, ob eher im Lückeninneren (auf interzeptionsarmen Kleinstandorten, zentralalpin) oder eher nahe am Stammfuss von Altbäumen unter Schirm (auf schneearmen Kleinstandorten, randalpin; Bischoff, 1987). Auch nicht entscheidend ist, wie gross der Flächenanteil ansamungsgünstiger Kleinstandorte innerhalb der Bestandesöffnungen ist, ob er beispielsweise eher bei 50% oder eher bei 10% liegt. In all diesen Fällen braucht die Fichtenansamung direkte Besonnung.

7. Tagesablauf der Direktstrahlung in Bestandesöffnungen unterschiedlicher Exposition und Ansamungsökologie der Fichte

7.1 Stellenwert und Geltungsbereich der Überlegungen

Ausgehend von der Direktstrahlungsverteilung am Südhang und am Nordnordwesthang in Sedrun soll nun versucht werden, Form, Grösse und Ausrichtung von Bestandesöffnungen in anderer Exposition vorzuschlagen. Diese Vorschläge dürfen nicht als erprobte waldbauliche Anleitungen verstanden werden, sondern nur als begründete vorläufige Vermutungen. Es geht hier also um eine grundsätzliche Diskussion, um ein Auslegen von Ideen, um das Stellen der richtigen Fragen. Keinesfalls soll ein Waldbau nach Schema propagiert werden.

Immerhin können wir auf den Erfahrungsschatz von *Trepp* (1955), *Bischoff* (1987) und *Ott* (1995) zurückgreifen. Die in Sedrun festgestellte Direktstrahlungsverteilung im Tagesablauf dürfte zwar für kleine Bestandesöffnungen in rottig strukturierten Fichtenbeständen allgemein gelten, nicht aber das Zusammenspiel der ansamungsökologisch bestimmenden Faktoren. Andernorts sind z.B. die Hauptniederschlagsrichtung, die Hauptsturmrichtung und die Schneeverhältnisse anders als in Sedrun. Die nachstehenden Vorschläge zur Ausformung von Bestandesöffnungen gelten nur in folgenden Fällen:

1. Die Fichtenbestände sind rottig-durchlässig strukturiert (mit «Wänden» und «Fenstern»).
2. Die Fichtenbestände befinden sich im Klima der Zwischenalpen. In den nördlichen Randalpen sind Interzeption und Trockenstress weniger problematisch, Schneewirkungen dagegen schwerwiegender; in den Zentralalpen ist es umgekehrt. In diesem Sinne können die Überlegungen angepasst werden.
3. Sturmwinde und Niederschlag kommen vorwiegend aus westlicher Richtung.
4. Die Bewölkungsverteilung im Tagesablauf ist gleichmässig. Nachmittagsgewitter treten nicht so häufig auf, dass sie die Sonnenscheindauer wesentlich beeinflussen.
5. Die Oberböden sind durchlässig, also nicht vernässt.
6. Die Hangneigung liegt zwischen 30 und 80%.
7. Es sind ansamungsgünstige Kleinstandorte vorhanden, z.B. solche ohne oder mit nur lockerer Vegetation oder erhöhte Kleinstandorte.

Die folgenden Überlegungen verlangen ein ausgezeichnetes räumliches Vorstellungsvermögen. Es wird empfohlen, einen Karton-Modellhang mit unterschiedlich gerichteten Schlitzen auf ein Himmelskreuz zu legen und damit die Kombinationen von Exposition und Schlitzrichtung nachzustellen.

7.2 Direktstrahlungsverteilung und Ansamungsökologie der Fichte bei leichter Drehung der Schlitze am Nordnordwesthang

Die dominante Komponente der Direktstrahlung ist am Nordnordwesthang die Direktstrahlung mittags. Dies gilt unabhängig von der Ausrichtung der Schlitze, also auch wenn die Sonne mittags nicht parallel zur Schlitzrichtung einstrahlen kann. Werden die Schlitze am Nordnordwesthang von ihrer ESE-WNW-Richtung mehr in Richtung SE-NW gedreht, also steiler angelegt, kann die Sonne den Boden der Bestandesöffnungen am Vormittag knapp erreichen. Am Abend hingegen geht die Sonne unter, bevor sie in grösserem Masse einstrahlen kann. Diese Variante ist insgesamt kühler und daher ansamungsökologisch ungünstiger.

Werden die Schlitze in Richtung SW-NE gedreht, steht die Sonne früher am Nachmittag parallel zur Schlitzrichtung. Des steileren Sonnenwinkels wegen ist die Sonnenscheindauer etwas länger und die eintreffende Direktstrahlung energiereicher. Diese Variante ist damit insgesamt wärmer als ein ESE-WNW-gerichteter Schlitz. Nachteilig ist, dass hier gerade die am talseitigen Bestandesrand liegenden bestbesonnten Kleinstandorte im Regenschatten liegen. Ansamungsökologisch ist ein SW-NE-gerichteter Schlitz somit insgesamt eher etwas ungünstiger als ein ESE-WNW-gerichteter Schlitz.

7.3 Direktstrahlungsverteilung und Ansamungsökologie der Fichte in anderen Expositionen

Unterschiedlich gerichtete Bestandesöffnungen in unterschiedlichen Expositionen sind in *Abbildung 3* dargestellt und in *Tabelle 1* strahlungsmässig und ansamungsökologisch bewertet. Es sollen hier nicht alle Fälle im Detail durchdiskutiert werden, sondern nur einige interessante, in der generellen Reihenfolge von Nord nach Süd. Schlitze, deren Achse in einem grösseren Winkel als 45 Grad zur Hangfalllinie liegt, sind grundsätzlich in allen Expositionen möglich. Sie sind nur teilweise dargestellt (*Abbildung 3, c und d*). Ansamungsökologisch besonders günstig zu bewerten sind Schlitze, in denen die bestbesonnten Kleinstandorte in Regen-Luvlage liegen (schräffiert).

Zunächst werde der Modellhang von Nordnordwest (wie in Sedrun) nach Nord gedreht. In SE-NW-gerichteten Schlitzen (a in *Abbildung 3*) erreicht nun – im Vergleich zum ESE-WNW-gerichteten Schlitz am Nordnordwesthang – die Vormittagssonne einen grösseren Teil der Schlitze, während die Nachmittagssonne weniger einstrahlen kann. Für die Mittagssonne, die ja bezüglich eingestrahlter Energie am wichtigsten ist, ändert sich nichts. Insgesamt dürfte der Direktstrahlungsgenuss in beiden Fällen gleich sein. In SW-NE-gerichteten Schlitzen (b) strahlt die Sonne später am Nachmittag parallel zur Schlitzrichtung ein als in SSW-NNE-gerichteten Schlitzen am Nordnordwesthang, weshalb die Schlitze am Nordhang kühler sind. Schlitze, deren Achse in einem grösseren Winkel als 45 Grad zur Hangfalllinie liegt (c und d), sind kühler als in einem Winkel von 45 Grad zur Hangfalllinie liegende, weil die Sonne entweder früher am Morgen (c) oder später am Nachmittag (d) parallel zur Schlitzachse einstrahlt.

In NW- und NE-Exposition unterscheiden sich die beiden schräg zum Hang liegenden Schlitzrichtungen – W-E und S-N-gerichtet – bezüglich Direktstrahlung erheblich. S-N-gerichtete Schlitze sind wesentlich wärmer als W-E-gerichtete. Die Direktstrahlung wirkt in S-N-gerichteten Schlitzen intensiv ein, auf frischen (nicht feuchten) Standorten wahrscheinlich bereits so intensiv, dass die Keimung der Fichte auf Humusauflage behindert wird. Die Beobachtungen von *Imbeck und Ott (1987)* am talseitigen Schlitzrand im Lusiwald

Hauptwindrichtung

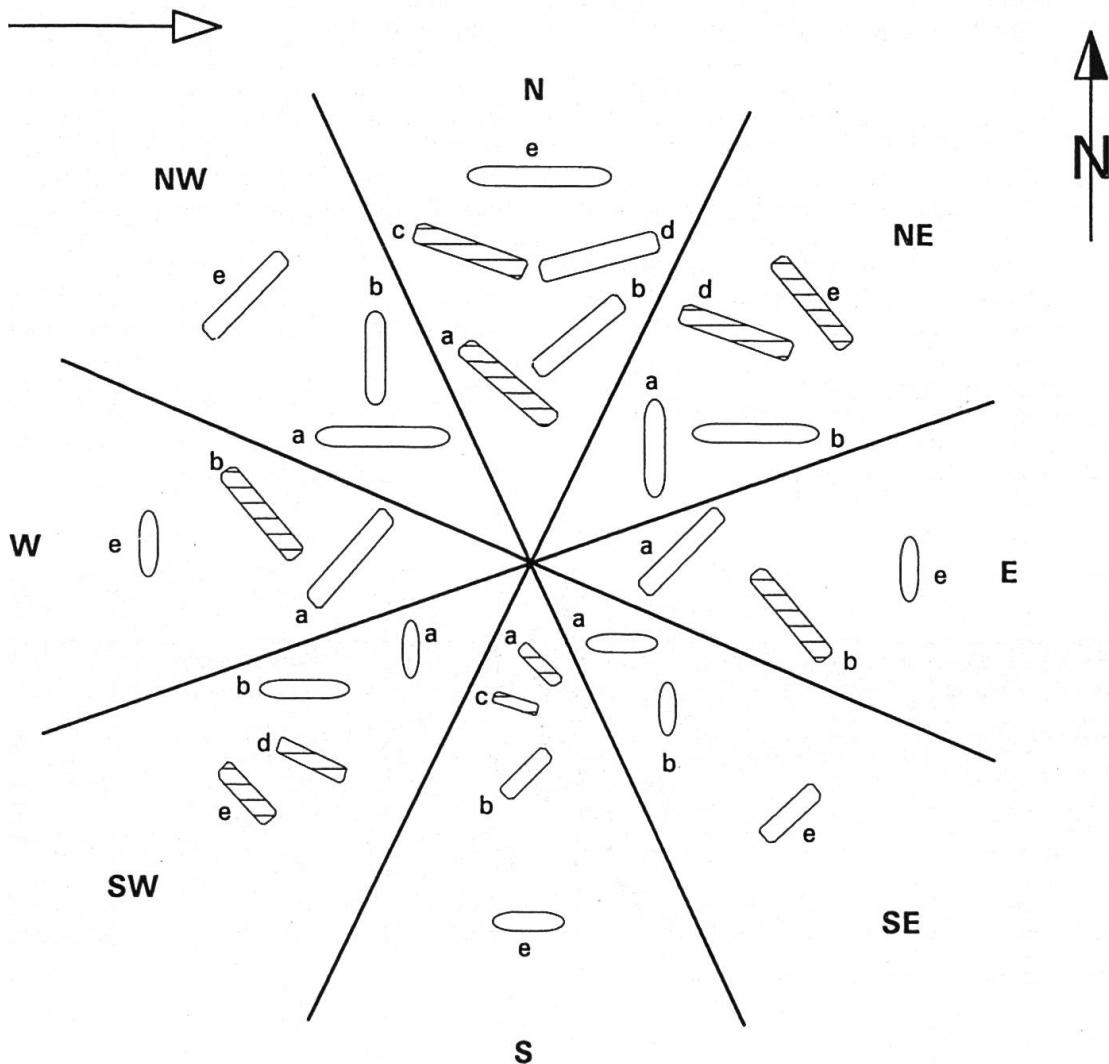


Abbildung 3. Schlitzförmige Bestandesöffnungen in hochmontanen und subalpinen Fichtenwäldern der Zwischenalpen an einem Modellhang (schematisch). – Die Strahlen des achtfachen Sterns stellen die Kanten eines Berges mit Gipfel im Mittelpunkt dar. Die Länge der schlitzförmigen Bestandesöffnungen nimmt von der Nord-Exposition zur Südexposition ab. Die Breite soll bei etwa 10 bis 15 m liegen. Schraffiert sind Bestandesöffnungen mit sonnenzugewandtem Bestandesrand in Regen-Luvlage. Die Ansamungsgunst für die Fichte in den einzelnen, mit Buchstaben bezeichneten Bestandesöffnungen ist teilweise im Text beschrieben und in *Tabelle 1* grob bewertet.

und diejenigen in Sedrun auf mittags intensiv bestrahlten Saatstellen am Südhang legen das nahe. Ob dem durch sehr schmale Schlitze entgegengewirkt werden kann, ist unklar; denn in schmalen Schlitzen tritt auch eher Interzep-
tion auf. W-E-gerichtete Schlitze sind daher ansamungsökologisch unproble-
matischer. Sie führen in NE-Exposition (b) zu einer Direktstrahlungsspitze am Vormittag, in NW-Exposition (a) am Nachmittag (Imbeck und Ott, 1987, S. 180). Gerade in NW-Exposition können aber E-W gerichtete Schlitze (a) zu «Schnee-

Tabelle 1. Beurteilung von Direktstrahlung und Ansamungsgunst in unterschiedlich gerichteten schlitzförmigen Bestandesöffnungen zwischenalpiner Fichtenwälder in Abhängigkeit von der Hangexposition. – Die Tabelle gibt ökologische Grundmuster wieder; sie ist nicht ohne eingehende Beobachtung im Gelände auf den Einzelfall anwendbar. Die Schlitzrichtung ist von oben nach unten (am Hang) angegeben. Die Klassierung der direkten Sonneneinstrahlung gibt die relative Bedeutung der Tageszeiten bezüglich Direktstrahlung pro Fall an. Sie lässt keinen Vergleich zwischen Expositionen zu. Die Beurteilung der Ansamungsgunst auf den ansamungsgünstigsten Kleinstandorten innerhalb der Bestandeslücken bezieht sich auf durchschnittliche Verhältnisse (s. Text Kapitel 7.1) in den Zwischenalpen und auf das Lückeninnere ausserhalb des direkten Schirms der Lückenrandbäume. Die Beurteilung der Ansamungsgunst lässt einen Vergleich zwischen Expositionen zu. N-S-gerichtete Schlitz sind generell überdurchschnittlich trockenheitsgefährdet, E-W-gerichtete vermutlich überdurchschnittlich sturmgefährdet. Die Schlitzlängen nehmen generell von oben nach unten stark ab (von maximal rund 100 m auf 30 m), werden aber hier nicht angegeben. x = Bezeichnung in Abbildung 3.

Bewertung der direkten Sonneneinstrahlung:

- + Direktstrahlung vorhanden
- ++ mittlere Direktstrahlung
- +++ starke Direktstrahlung, am wichtigsten
- ≡ Direktstrahlung parallel zur Schlitzrichtung

Bemerkungen:

- ♣ überdurchschnittliche Schneearnsammlung wahrscheinlich
- † Trockenheitsgefahr
- †† ausgeprägte Trockenheitsgefahr
- ↓ bestbesetzte Kleinstandorte erhalten auch viel Niederschlag

Exposition	Schlitzrichtung	x	Tageszeit der Sonneneinstrahlung im Sommer (Sommerzeit, Stunden)					Ansamungsgunst	Bemerkungen zur Anwendung
			7-10	10-12	12-15	15-17	17-20		
N ↑	SE-NW	a		++≡	+++	+		sehr gut sehr gut schlecht	↓ ♣ zu kühl
	SW-NE	b		+	+++	++≡			
	E-W	e	+=	++	+++	++	+=		
NW ↖	E-W	a	≡	+	+++	+	++≡	gut gut gut	♣ in trockeneren Lagen in feuchteren Lagen
	S-N	b		+	++++≡	+	+		
	NE-SW	e		+	+++	++≡	+		
NE ↗	S-N	a	+	+	++++≡	+		gut mässig gut	†♣ ↓ in feuchteren Lagen
	W-E	b	++≡	+	+++	+			
	NW-SE	e	+	++≡	+++	+	≡		
W ↖	NE-SW	a		+	+++	+++=	+	mässig gut mässig	† ↓ † nur in feuchteren Lagen
	SE-NW	b		++≡	+++	++	+		
	N-S	e		+	+++=	++	+		
E →	SW-NE	a	+	++	+++	++≡		schlecht mässig schlecht	† † ↓ †† nur in feuchteren Lagen
	NW-SE	b	+	+++=	+++	+			
	N-S	e	+	++	+++=	+			
SE ↘	W-E	a	++≡	++	+++	+	≡	mässig schlecht schlecht	† †† †† nur in feuchteren Lagen
	N-S	b	+	++	+++=	+			
	NE-SW	e	+	++	+++	+++=			
SW ↖	N-S	a		+	+++=	++	+	schlecht schlecht mässig	†† †♣ † ↓
	E-W	b	≡	+	+++	++	++≡		
	NW-SE	e	+++=	+++	++	+			
S ↓	NW-SE	a	+	++≡	+++	++	+	schlecht schlecht mässig	† ↓ †† † Niederschlag maximal
	NE-SW	b	+	++	+++	++≡	+		
	W-E	e	+=	++	+++	++	+=		

löchern» werden. Dies wurde in NNW-Exposition in Sedrun beobachtet (M. Frehner, mündliche Mitteilung). Solche Schlitze sind in NW-Exposition auch überdurchschnittlich sturmgefährdet. In NE-Exposition sind in einem Winkel von etwa 70 Grad (d) bis senkrecht (e) zur Hangfalllinie ausgerichtete Schlitze besonders günstig, weil dann die Sonne auf Regen-Luvlagen gelenkt wird.

In W-Exposition werden Schlitze, die schief zum Hang liegen, parallel zur Schlitzachse etwa gleich stark besonnt, NE-SW-gerichtete (a) am Nachmittag, SE-NW-gerichtete (b) kurz vor Mittag. Da aber senkrecht zur Schlitzrichtung Direktstrahlung hinzukommt (NE-SW: vormittags, wenig, SE-NW: am späteren Nachmittag, beträchtlich), sollten SE-NW-gerichtete Schlitze (b) kürzer sein als etwa zwei Baumlängen, um die Direktstrahlung nicht zu intensiv werden zu lassen. Die mehr Direktstrahlung erhaltenden SE-NW-gerichteten Schlitze (b) erhalten immerhin am bestbesonnten bergseitigen Bestandesrand auch viel Niederschlag. Das ist bei NE-SW-gerichteten Schlitzen (a) nicht der Fall. N-S-gerichtete Schlitze (e) parallel zu den Höhenlinien sind nicht auszuschliessen. Sie dürften aber in trockeneren Lagen zu heiss und trocken werden. Daher sollten sie kürzer als etwa eine Baumlänge sein.

Ostexponierte Hänge sind westexponierten grundsätzlich vergleichbar. Sie sind aber etwas trockener, da sie in Mitteleuropa häufig im Regenschatten liegen. NW-SE-gerichtete Schlitze (b) sind wärmer als SW-NE-gerichtete (a), und in ersteren (b) wird der Niederschlag auf den talseitigen, stark besonnten Bestandesrand gelenkt. N-S-gerichtete Schlitze (e) sind des Regenschattens wegen eher trockener als in W-Exposition und daher ungünstig zu bewerten. Wenn sie überhaupt in Betracht gezogen werden, dann müssen sie sehr kurz sein.

SE- und SW-gerichtete Hänge sind bereits mit der reinen Süd-Exposition vergleichbar. SE-Hänge sind des Regenschattens wegen eher trockener als SW-Hänge. In SE-Exposition empfangen W-E-gerichtete Schlitze (a) am meisten Niederschlag. Dominant ist in ihnen die im Vergleich zur Mittagssonne wesentlich mildere Vormittagssonne; ein beträchtlicher Anteil an Mittagssonne lässt sich aber kaum verhindern. Mit längeren Schlitzen lässt sich die Interzeption gering halten. Das Ausnützen von gut besonnten Regen-Luvlagen mit WNW-ESE-gerichteten Schlitzen ist kaum möglich, da die Gefahr des Schneegleitens hier zu gross ist (vgl. *Kreiliger*, 1994). N-S-gerichtete Schlitze (b) empfangen zu viel Direktstrahlung mittags und sind daher ansamungsökologisch ungünstig. Parallel zu den Höhenlinien liegende Schlitze (e) sind nur in feuchteren Lagen (nördliche Randalpen) möglich; sie sind gegenüber W-E-gerichteten direktstrahlungsbegünstigt und regenbenachteiligt. Zudem empfängt vor allem der talseitige Rand mehr Regen (anstatt der besonnte bergseitige).

In SW-Exposition hingegen sind NW-SE-gerichtete Schlitze (e) möglich und haben den Vorteil, dass der bergseitige Rand, der gleichzeitig direktstrahlungsbegünstigt ist, mehr Regen erhält als der talseitige. Ebenfalls günstig (und etwas kühler) sind WNW-ESE-gerichtete Schlitze (d).

8. Schlussfolgerungen

In hochmontanen und subalpinen Fichten-Schutzwäldern der Zwischenalpen sind neben dem Wildschadenproblem (Brändli, 1995) auch zentrale waldbauliche Aufgaben noch zu lösen. Dazu gehören die Überführung gleichförmiger Bestände zur Gebirgs-Plenterstruktur, die Verjüngung aufgelichteter Bestände mit verjüngungsverdämmender Vegetation und die Bewältigung von Borkenkäfer-Kalamitäten. Am Beginn der Überführung zur Gebirgs-Plenterstruktur steht die Förderung der Ansamung. Ergebnisse einer in Sedrun durchgeführten ansamungsökologischen Untersuchung erlauben es, vorläufige Grundsätze zur Ausformung von Bestandesöffnungen in Fichten-Gebirgswäldern verschiedener Exposition zu formulieren und diese in Lösungsvorschläge umzusetzen. Damit soll der Praktiker zu weiterer Beobachtung und auch zum Ausprobieren angeregt werden. Keinesfalls sollen jetzt Berghänge mit Schlitten irgendwelcher Breite, Länge und Ausrichtung schematisch durchlöchert werden. Mit dem Öffnen der Bestände ist ein Ansamungserfolg noch lange nicht gesichert. Die Direktstrahlung ist nicht der einzige, den Ansamungserfolg bestimmende Faktor. Wirkungen des Niederschlags, des Schnees, des Schneeschirms, der Vegetation und vor allem auch des Wildes auf die Ansamung können ebenfalls entscheidend sein. Weitere Forschungs- und Beobachtungsarbeit zur Ansamungsökologie der Fichte ist nötig, um die hier aufgestellten Empfehlungen zur Ausformung von Bestandesöffnungen bestätigen oder korrigieren zu können.

Von praktischer Bedeutung ist der Befund, dass die Sonnenscheindauerwerte, die so einfach mit dem Horizontoskop bestimmt werden können, in Sedrun fast gleich stark mit dem Überleben und dem Wachstum der Fichtenansamung zusammenhängen wie mit Fischaugenfotos gewonnene Schätzungen der direkt eingestrahlten Energie (Brang, 1996).

Zusammenfassung

In hochmontanen und subalpinen Fichtenwäldern beeinflusst die Direktstrahlung die Ansamung der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) entscheidend. Mit Fischaugenfotos wurde die Direktstrahlungsverteilung in kleinen Bestandesöffnungen an einem Nordnordwesthang und an einem Südhang bei Sedrun (Graubünden, Schweiz) geschätzt. In schlitzförmigen Bestandesöffnungen am Nordnordwesthang kommen längere Sonnenflecken wie beabsichtigt vor allem nachmittags vor, wenn die Sonne parallel zur Schlitzrichtung einstrahlt. Da die Bestände rottig strukturiert und damit lichtdurchlässig sind, ist die Sonnenfleckenverteilung im Tagesablauf ungeachtet der Schlitzrichtung aber recht gleichmäßig und trägt Direktstrahlung mittags am meisten zur eingestrahlten Energie bei. In kleinen runden bis rechteckigen Bestandesöffnungen am Südhang zeigen sich Direktstrahlungsspitzen um die Mittagszeit. Basierend auf einem die natür-

liche Ansamung imitierenden Saatversuch in Bestandesöffnungen beider Expositionen wird der Zusammenhang zwischen Ansamungsgunst und Schlitzform, -grösse und -ausrichtung in Fichten-Gebirgswäldern unterschiedlicher Exposition in den Zwischenalpen diskutiert. Schlitze erlauben eine gezielte und dosierte Beeinflussung der gerichteten Witterungseinflüsse wie Direktstrahlung und Niederschlag. Mit zweckmässig ausgerichteten Schlitzen lassen sich günstige Bedingungen für die Ansamung der Fichte schaffen. Besonders günstig scheinen Bestandesöffnungen, in denen die besonnenen Bestandesränder in Regen-Luvlage liegen.

Résumé

Ensemencement potentiel de l'épicéa et distribution du rayonnement direct dans des ouvertures du peuplement en forme de fente des pessières des Alpes intermédiaires

Dans les pessières de l'étage montagnard supérieur et subalpin, le rayonnement solaire direct influence de manière déterminante l'ensemencement de l'épicéa (*Picea abies* (L.) Karst.). A l'aide de photographies hémisphériques, la répartition du rayonnement direct a été mesurée dans de petites ouvertures du peuplement sur un flanc nord-nord-ouest et sud près de Sedrun (canton des Grisons, Suisse). Dans des ouvertures en forme de fente étroite sur le flanc nord-nord-ouest, les taches solaires de plus longue durée apparaissent, comme prévu, l'après-midi lorsque le rayonnement solaire est parallèle à la direction de la fente. Indépendamment de la direction de la fente, la grande transparence à la lumière des peuplements structurés en collectifs rend passablement régulière la répartition des taches solaires au cours de la journée. L'ensoleillement direct de midi contribue le plus à l'apport d'énergie solaire. Dans des petites ouvertures circulaires à rectangulaires situées dans les peuplements du versant sud, les pointes de rayonnement direct les plus intenses ont lieu aux environs de midi. Le lien entre l'ensemencement potentiel, la forme, la taille et l'orientation de la fente dans des pessières de différentes expositions dans les Alpes intermédiaires est discuté. Cette discussion se base sur un essai d'ensemencement imitant les conditions naturelles dans des trouées de peuplements situés sur les deux expositions. Les fentes permettent de doser finement les phénomènes atmosphériques directionnels comme le rayonnement direct et les précipitations. En dirigeant convenablement les fentes, on peut créer des conditions favorables pour l'ensemencement de l'épicéa. Les ouvertures du peuplement, dans lesquelles la lisière ensoleillée correspond à l'arrivée des vents de pluie, semblent particulièrement favorables.

Traduction: Raphaël Guerdat

Summary

Seedling establishment and distribution of direct radiation in slit-shaped openings of Norway spruce forests in the intermediate Alps

Direct radiation is crucial for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) seedling establishment in high-montane and subalpine spruce forests. Fisheye photography was used to estimate the daily distribution of direct radiation in small forest openings on a north-northwest and a south facing slope near Sedrun (Grisons, Switzerland). In slit-shaped openings on the north-northwest facing slope, long sunflecks mostly occurred in the afternoon, when the sun shines parallel to the slit axis. This is in accordance to the silvicultural intention. However, since the stands are clumpy and therefore pervious to sunlight, the daily sunfleck distribution is fairly even notwithstanding the slit orientation, and direct radiation at noon is the dominant form of incident energy. In small circular to rectangular openings on the south facing slope, direct radiation peaks at noontide. A seeding trial imitating natural seedling establishment was set in place in openings on both slopes. Based on this trial, the relations among seedling establishment, aspect, slit shape, size and orientation are discussed for Norway spruce forests in the intermediate Alps. The directional weather factors such as radiation and precipitation can be highly influenced by slits, which is why suitable microclimate for seedling establishment can be promoted provided the slits are oriented appropriately. Slits in which the most insolated edges are oriented windward are especially favourable.

Literatur

- Alexander, R.R. (1973): Partial cutting in old-growth spruce-fir. Res. Pap., USDA For. Serv., Rocky Mountains For. a. Range Exp. Stat. 110: 16 S.
- Bartsch, N. (1985): Ökologische Untersuchungen zur Wurzelentwicklung an Jungpflanzen von Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) und Kiefer (*Pinus silvestris* L.). Diss., Georg-August-Univ. Göttingen. 231 S.
- Bernier, N., und Ponge, J.-F. (1994): Humus form dynamics during the sylvogenetic cycle in a mountain spruce forest. Soil Biol. a. Biochem. 26: 183–220.
- Bischoff, N. (1987): Pflege des Gebirgswaldes: Leitfaden für die Begründung und forstliche Nutzung von Gebirgswäldern. Herausgeber: Konferenz der kantonalen Forstdirektoren, Kantonsoberförsterkonferenz, Bundesamt für Forstwesen und Landschaftsschutz. Eidg. Drucksachen- u. Materialzentrale, Bern. 379 S.
- Brändli, U.-B. (1995): Zur Verjüngungs- und Wildschadenssituation im Gebirgswald der Schweiz: Regionale Ergebnisse des ersten Landesforstinventars (LFI), 1983/85. Schweiz. Z. Forstwes. 146: 355–378.
- Brang, P. (1996): Experimentelle Untersuchungen zur Ansamungsökologie der Fichte im zwischenalpinen Gebirgswald. Diss., Prof. f. Waldbau, ETH Zürich. Beih. Schweiz. Z. Forstwes. 77: 375 S.
- Coates, K.D., Emmingham, W.H., und Radosevich, S.R. (1991): Conifer-seedling success and microclimate at different levels of herb and shrub cover in a *Rhododendron-Vaccinium-Menziesia* community of south central British Columbia. Can. J. For. Res. 21: 858–866.
- Day, T.A., Delucia, E.H., und Smith, W.K. (1989): Influence of cold soil and snowcover on photosynthesis and leaf conductance in two Rocky Mountains conifers. Oecologia 80: 546–552.
- Ellenberg, H., und Klötzli, F. (1972): Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Mitt. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes. 48: 587–930.

- Frehner, M.* (1989): Beobachtungen zur Einleitung der Naturverjüngung an einem nordexponierten Steilhang im subalpinen Fichtenwald. Schweiz. Z. Forstwes. 140: 1013–1022.
- Frey, H.-U.* (1995): Waldgesellschaften und Waldstandorte im St. Galler Berggebiet. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich 126a.
- Furrer, R.* (1994): Analyse der Fichtensukzession (*Picea abies* (L.) Karst.) in Vogelbeervorwaldungen (*Sorbus aucuparia* L.) auf zwei subalpinen Standorten in der Innerschweiz. Diplomarbeit, Prof. f. Waldbau, ETH Zürich, unveröff. 92 S.
- Gensler, G.A.* (1978): Das Klima von Graubünden: Ein Beitrag zur Regionalklimatologie der Schweiz. Arbeitsber. Schweiz. Meteor. Zentralanst. 77: 122 S.
- Gregori, P.* (1967): Ricerche sulla germinazione del seme di abete bianco, picea e larice. Ann. dell'Accad. Ital. di Sci. For. 16: 155–178.
- Imbeck, H.* und *Ott, E.* (1987): Verjüngungsökologische Untersuchungen in einem hochstaudenreichen subalpinen Fichtenwald, mit spezieller Berücksichtigung der Schneearlagerung und der Lawinenbildung. Mitt. Eidg. Inst. Schnee- u. Lawinenforsch. 42: 202 S.
- Kreiliger, M.* (1994): Einflüsse des Sonnenlichtes in Verjüngungsbeständen im Bündner Oberland. Bündnerwald 47: 75–81.
- Ladefoged, K.* (1939): Untersuchungen über die Periodizität im Ausbruch und Längenwachstum der Wurzeln bei einigen unserer gewöhnlichsten Waldbäume. Det Forstl. Forsögsvaes. i Danmark 16.
- Lüscher, F.* (1990): Untersuchungen zur Höhenentwicklung der Fichtennaturverjüngung im inneralpinen Gebirgswald. Diss., Prof. f. Waldbau, ETH Zürich. 83 + 55 S.
- Mettin, C.* (1977): Zustand und Dynamik der Verjüngung der Hochlagenwälder im Werdenfelser Land. Diss., Forstwiss. Fak., Univ. München. 161 S.
- Meyer-Grass, M.* (1985): Waldlawinen: Gefährdete Bestände, Massnahmen. Eidg. Inst. Schnee- u. Lawinenforsch., Merkbl. 1: 6 S.
- Ott, E.* (1995): Eigenart und Verjüngung der Gebirgsnadelwälder. Vorlesungs-Manuskript, unveröff. 40 S.
- Ott, E., Lüscher, F., Frehner, M., und Brang, P.* (1991): Verjüngungsökologische Besonderheiten im Gebirgsfichtenwald im Vergleich zur Bergwaldstufe. Schweiz. Z. Forstwes. 142: 879–904.
- Rohmeder, E.* (1951): Beiträge zur Keimungsphysiologie der Forstpflanzen. Bayerischer Landwirtschaftsverlag, München. 140 S.
- Savill, P.S.* (1983): Silviculture in windy climates. For. abstracts 44: 473–488.
- Schütz, J.-Ph., und Brang, P.* (1995): L'horizontoscope: un étonnant outil pratique de sylviculture, notamment en haute montagne. Off. Nat. d. Forêts, Bull. Techn. 28. 7 S.
- SYSTAT Inc.* (1992): SYSTAT für Windows, Version 5: Graphics. SYSTAT Inc., Evanston/Illinois. 636 S.
- Tonne, F.* (1954): Besser bauen mit Besonnungs- und Tageslichtplanung. K. Hofmann, Schorndorf/Stuttgart.
- Tranquillini, W.* (1979): Physiological ecology of the alpine timberline. Springer, New York. 137 S.
- Trepp, W.* (1955): Subalpiner Fichtenwald. Bündnerwald, Beih. 5: 27–44.
- Turner, H., und Streule, A.* (1983): Wurzelwachstum und Sprossentwicklung junger Koniferen im Klimastress der alpinen Waldgrenze, mit Berücksichtigung von Mikroklima, Photosynthese und Stoffproduktion. In Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung. Internat. Symp. Gumpenstein 1982, Bundesanstalt Gumpenstein, A-8952 Irdning: 617–635.
- Wasser, B., und Frehner, M.* (1996): Wegleitung Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion; Vollzug Umwelt. BUWAL. Bezugsquelle: Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern; Bestellnr. 310.051d; Preis: Fr. 25.–. (Hinweis: Die Publikation ist auch in französischer und italienischer Sprache erhältlich.)

Dank

Ich bin Dr. Andreas Brunner, Philippe Duc, PD Dr. Ernst Ott und Dr. Walter Schönenberger für die kritische Durchsicht einer früheren Fassung dieses Aufsatzes und für fruchtbare Verbesserungsvorschläge sehr dankbar.

Verfasser: Dr. Peter Brang, Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, Canada V5A 1S6.