



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Fehlende Verjüngung im Lärchenwald bei Valchava

Lea Grass

September 2013 - März 2014

Masterarbeit

in der Forschungseinheit Waldböden und Biogeochemie

WSL Birmensdorf

und

an der Professur für Waldökologie, Department Umweltsystemwissenschaften

ETH Zürich

Referent: Prof. Dr. Harald Bugmann

Betreut durch: Dr. Stephan Zimmermann, Dr. Hans-Ulrich Frey

Zusammenfassung

Am Südhang, nördlich des Dorfes Valchava im bündnerischen Müstertal steht ein Lärchenwald, der frei von Fichten ist und sich nicht verjüngt. Es wurde vermutet, dass das Wasser der limitierende Faktor für die Verjüngung ist. Die Sonneneinstrahlung ist hoch, was hohe Temperaturen auf der Bodenoberfläche und eine hohe Verdunstungsrate zur Folge hat und den Oberboden austrocknet.

Mit MPS-2 Sonden und Temperatursensoren wurden während dem Sommer 2013 die Saugspannung im Boden und die Temperatur auf der Bodenoberfläche gemessen. Dies in Bestandeslücken des Lärchenwaldes und zur Kontrolle in Bestandeslücken eines Fichtenwaldes im Val Vau. Auch wurden für die Simulation der Sonnenstrahlung in jeder Lücke hemisphärische Fotos aufgenommen und ausgewertet. Zudem wurden die Bodenvegetation und die Mächtigkeit der Streuauflage untersucht.

Es fällt signifikant mehr Strahlung in die Lücken des Lärchenwaldes. Zudem ist es im Lärchenwald wärmer und trockener. Der Boden in den Lücken des Lärchenwaldes wird mehrheitlich von einer dichten Grasvegetation bedeckt, während im Fichtenwald vor allem Moos und Zwergsträucher zu finden sind. Die Streuauflage ist im Lärchenwald deutlich mächtiger als im Fichtenwald.

Die erhöhte Strahlung und die Bodenvegetation trocknen den Boden des Lärchenwaldes aus. Die Streuauflage und die Bodenvegetation sind ein ungünstiges Keimbeet, die Verjüngung kann sich nicht gegen die üppige Bodenvegetation durchsetzen. Im Fichtenwald herrschen deutlich verjüngungsgünstigere Bedingungen als im Lärchenwald. Zudem ist der untere Bereich einer Lücke, in welchem feuchtere Bedingungen als im oberen Bereich zu finden sind, verjüngungsgünstiger. Eine erfolgreiche Verjüngung ist auf einen optimalen Mikrostandort angewiesen, der nicht von einer üppigen Grasvegetation oder einer dicken Streuschicht bedeckt und keiner hohen Strahlung ausgesetzt ist. Diese Mikrostandorte sind im Lärchenwald jedoch äusserst selten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Fragestellung und Hypothesen	1
2	Methoden	3
2.1	Untersuchungsgebiet	3
2.1.1	Geographie	3
2.1.2	Klima	3
2.1.3	Geologie und Boden	4
2.1.4	Waldgeschichte	4
2.1.5	Baumarten	5
2.2	Feld- und Laborarbeit	6
2.3	Bodenwasser-Modell	10
2.4	Statistische Auswertung	10
2.4.1	Signifikanzanalyse	10
2.4.2	Linear-mixed-effect-Model	11
3	Resultate	13
3.1	Feldbeobachtungen	13
3.2	Licht	17
3.3	Temperatur	20
3.4	Bodenwasserhaushalt	22
3.5	Effekt verschiedener Faktoren auf die Verjüngung	25
4	Diskussion	27
4.1	Allgemeine Beobachtungen	27
4.2	Licht	27
4.3	Temperatur und Bodenwasserhaushalt	28
4.4	Der Lärchenwald und der Fichtenwald im Vergleich	29
4.5	Der obere und der untere Rand der Lücken im Vergleich	31
4.6	Widersprüche	32
4.7	Methodenkritik	33
4.8	Weiterführendes	34
5	Schlussfolgerung	35
6	Dank	37
7	Schlusswort	39
	Literaturverzeichnis	41

Abbildungsverzeichnis	47
Tabellenverzeichnis	51
8 Anhang	53
8.1 Abbildungen	53
8.2 R-Code	78
8.2.1 Bodenwasser - Modell	78
8.2.2 statistische Auswertung	80
8.3 Tabellen	85

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Eine funktionierende Verjüngung ist für den Erhalt und das Fortbestehen eines Waldbestandes essentiell. Der Erfolg der Verjüngung hängt von verschiedenen Umweltfaktoren ab. Zur Keimung sind genügend Wärme und Feuchtigkeit erforderlich (Brang 1996; Bonner und Farmer 1966; Dai 1996; Duryea und Brown 1984; Gray und Spiess 1997; Larcher 2003; Moore und Kidd 1982; Ott et al. 1991). Aber auch das Licht (Brang 1996; Brang 1998; Frehner 2001; Larcher 2003), die Streuauflage (Brang 1996; Pelissier 1993) und die Konkurrenz mit der Bodenvegetation (Brang 1996; Diaci et al. 2005; Frehner 2001; Hunziker und Brang 2005; Ott et al. 1991; Reif und Przybilla 1995; Valkonen und Maguire 2005) haben einen Einfluss auf den Erfolg der Verjüngung. Zudem sind Wildverbiss (Ott et al. 1991), Samenprädation (Hanssen 2002), sowie die Qualität und die Verfügbarkeit der Samen und somit der Zustand der Mutterbäume (Dieckert 1963; Hanssen 2002; LePage 2000; Saksa und Valkonen 2011; Negi 1998) entscheidende Faktoren für die Verjüngung.

Der Keimling braucht genügend Licht, weshalb die Verjüngung vor allem in Bestandeslücken zu finden ist (Brang 1996; Dai 1996; Gray und Spiess 1997; Larcher 2003). Gute Mikrostandorte für die Verjüngung in einer Bestandeslücke sind solche auf Mineralerde, mit geringer Interzeption, ohne direkte Mittagssonne und erhöhte Kleinstandorte wie Moderholz (Brang 1996).

Am Südhang nördlich des Dorfes Valchava steht ein Lärchenwald, der frei von Fichten ist. Dies, in der hochmontanen Stufe der kontinentalen Hochalpen auf der Höhenstufe der Tannen-Fichtenwälder (Waldstandorte; 2013), im Münstertal wo die Fichte die häufigste Baumart ist (Val Müstair; 2014). An diesem Hang hat es kaum Verjüngung. Nicht nur die Fichte, auch die Lärche hat Mühe sich zu verjüngen. Am Nordhang südlich von Valchava wachsen Fichten an südexponierten Standorten und auch am Südhang im Val Vau, einem Seitental des Münstertals, wachsen Fichten und verjüngt sich die Lärche ohne Probleme.

1.2 Fragestellung und Hypothesen

Ziel dieser Arbeit ist es, mutmassliche Ursachen für das Fehlen der Fichte und die fehlende Verjüngung zu finden.

Aufgrund zeitlicher und technischer Einschränkungen kann nicht auf alle Faktoren, welche die Verjüngung beeinflussen, eingegangen werden. Es wird vermutet, dass der Lärchenwald ein guter Wintereinstandort für Hirsche ist, weshalb der Druck durch Wildverbiss hoch ist und eine Rolle für die Verjüngung spielt. Diese Arbeit wird jedoch in einem begrenzten Zeitraum durchgeführt, weshalb der Wildverbiss nicht untersucht werden konnte. Diese Studie konzentriert sich auf die Untersuchung der Sonneneinstrahlung, der Temperatur des Bodens und dessen Wasserhaushalt, sowie der Streuauflage und der Bodenvegetation. Es wird vermutet, dass dies mitentscheidende Faktoren sind, welche die Verjüngung verhindern. Denn in der Literatur wird beschrieben, dass Wasser an Südhängen der limitierende Faktor ist, da die verstärkte Strahlung den Hang erwärmt, was wiederum zu einer höheren Verdunstungsrate führt (Brang 1998; Duryea und Brown 1984; Mitscherlich 1981).

Lärchen haben lichte Kronen, welche wenig Strahlung absorbieren. Fichten hingegen bilden gegen Süden eine

Kulisse, weshalb am unteren Rand einer Lücke wenig direkte Strahlung den Boden erreicht. Dies verhindert hohe Temperaturen am unteren Rand und hemmt die Austrocknung. Der verjüngungsgünstigste Standort befindet sich in Muldenlage am unteren Rand einer Lücke und wird nicht überschirmt. Dank der Beschattung durch die grossen Bäume ist die direkte Strahlung gering. Trotzdem erreicht viel Licht den Boden, was für eine erfolgreiche Verjüngung essentiell ist. Im Gegensatz dazu ist der obere Rand einer Lücke in Kuppenlage unter Schirm der ungünstigste Standort für die Verjüngung. Die direkte Strahlung ist intensiv, ausserdem wird die Wasserversorgung bei Niederschlag durch die Interzeption stark gehemmt. Im Lärchenwald besteht die Bodenvegetation vorwiegend aus Gräsern, welche einen dichten Teppich bilden und die Verjüngung verhindern, während die Gräser im Fichtenwald nur spärlich wachsen oder ganz fehlen.

Es werden zwei übergeordnete Fragestellungen untersucht:

- Ist der Fichtenwald verjüngungsgünstiger als der Lärchenwald?
- Ist der untere Rand der Lücken verjüngungsgünstiger als der obere Rand?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden folgende Hypothesen aufgestellt:

1. Der Oberboden im Lärchenwald ist trockener als jener im Fichtenwald.
2. Der untere Rand einer Lücke in Muldenlage ist weniger trocken als der obere Rand in Kuppenlage unter Schirm.
3. Die Strahlungsintensität im Lärchenwald ist höher als im Fichtenwald.
4. Die Strahlungsintensität am unteren Rand einer Lücke ist geringer als am oberen Rand.
5. Im Lärchenwald treten vermehrt hohe Temperaturen auf als im Fichtenwald.
6. Die Bodenvegetation im Lärchenwald ist dichter als jene im Fichtenwald.
7. Die Streuauflage im Lärchenwald ist grösser als im Fichtenwald.

2 Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

2.1.1 Geographie

Der untersuchte Lärchenwald liegt im Münstertal, nördlich des Dorfes Valchava ($40^{\circ}36'14''\text{N} / 10^{\circ}24'31''\text{O}$) zwischen 1480 müM und 1550 müM in südwestlicher Exposition. Zur Kontrolle dient der Südhang im Val Vau ($46^{\circ}35'14''\text{N} / 10^{\circ}23'29''\text{O}$) südlich von Valchava zwischen 1760 müM und 1820 müM in südlicher Exposition, an welchem ein Fichtenwald mit einzelnen Lärchen steht (Abbildung 2.1).

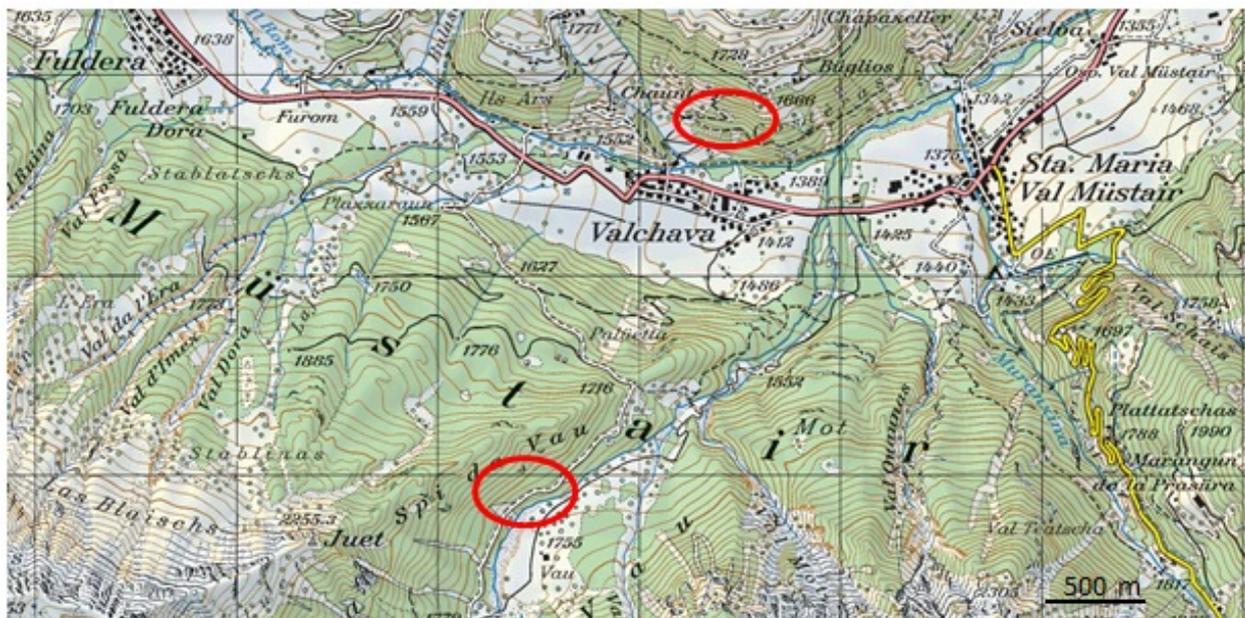


Abbildung 2.1: Untersuchungsgebiete: Der obere Kreis kennzeichnet den Lärchenwald und der untere den Fichtenwald (MapGeo 2013).

2.1.2 Klima

Valchava liegt in den kontinentalen Hochalpen in der hochmontanen Stufe (Frehner et al. 2005). Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei 5.9°C und die jährliche Niederschlagssumme beträgt 811 mm. Von Juni bis August fällt im Durchschnitt 301 mm Niederschlag (Klimadaten der Wetterstation in Sta. Maria von 1981-2010) (Meteo Schweiz 2013). Der Sommer in welchem diese Arbeit durchgeführt wurde, war ein überdurchschnittlich warmer Sommer mit wenig Niederschlag. Von Juni bis August fielen im Engadin lediglich 50% bis 70% Niederschlag des Normwertes (Klimabulletin 2013). Bei der Wetterstation in Sta. Maria wurden zwischen Juni und August bloss 178.3 mm Niederschlag gemessen (Meteo Schweiz 2014). Der Lärchenwald liegt in der Höhenstufe der Tannen-Fichtenwälder und der Fichtenwald in der Höhenstufe der subalpinen Fichtenwälder (Waldstandorte 2013).

2.1.3 Geologie und Boden

Der untersuchte Lärchenwald liegt in der Kristallinzone des Münstertals, in welcher metamorphe kristalline Gesteine und stark sauer verwitternder Verrucano die geologische Unterlage bilden. Der Fichtenwald hingegen liegt in der Karbonatzone der Unterengadiner Dolomiten. In der Literatur wird diese Zone als von Dolomit- und Kalkbergen geprägtes Gebiet beschrieben, in welchem aber auch Moränenzonen und Bereiche mit Verrucano- oder Kristallingestein vorkommen (Frey et al. 1998; Geoportal 2013). Die Beobachtungen im Feld lassen vermuten, dass der untersuchte Fichtenwald auf einer Verrucano-Insel steht (Abbildung 2.2). In beiden Wäldern sind Rohböden zu finden (Leisibach 2011) (Daten zu den Bodenprofilen Tabelle 8.1-8.6 im Anhang).



Abbildung 2.2: Bodenprofile: (a) Fichtenwald, Lücke 14 Plot 1 (b) Lärchenwald Lücke 2 Plot 5 (c) Lärchenwald Lücke 5 Plot 1 (M. Walser, WSL; L. Grass) (weiter Fotos von Bodenprofilen Abbildung 8.3-8.18 im Anhang).

2.1.4 Waldgeschichte

Es ist bekannt, dass nach Dorfbränden im 17. Jahrhundert das Gebiet Costeras-Taufers, in welchem sich der Lärchenwald befindet, für den Wiederaufbau der Dörfer Sta. Maria und Valchava kahlgeschlagen wurde. Genaue Aufzeichnungen darüber sind jedoch nicht vorhanden und es ist nicht klar ob damals Fichten oder Lärchen geschlagen worden waren. Alte Bewirtschaftungspläne wie der Waldplan (WP) 1955 zeigen, dass bei Valchava schon lange ein reiner Lärchenwald vorhanden war, welcher sich nie genügend natürlich verjüngt hat. Dabei hat die Beweidung eine grosse Rolle gespielt (WP 1903; WP 1928; WP 1984), später kam der Verbiss durch das Wild dazu (WP 1984). So wurde Anfangs des 20. Jahrhunderts das Gebiet Costeras aufgeforstet. Zwischen 1904 und 1910 wurden unter anderem 17'000 Lärchen gepflanzt und 1908 bis 1921 wurden 15 kg Lärchensamen ausgebracht. Die Ausfälle waren sehr gross, besonders bei den Aussaaten (Weber 2013). Das Alter der grossen Lärchen wurde auf circa 100 Jahre geschätzt, weshalb angenommen wird, dass es sich bei den heutigen Beständen um Pflanzungen der Aufforstung von 1904-1910 handelt.

2.1.5 Baumarten

Die Fichte (*Picea abies*) gehört zu den häufigsten Baumarten Mitteleuropas. Sie bevorzugt feuchte, leicht saure Standorte. Trockene Standorte meidet sie, da sie als Flachwurzler während trockenen Perioden stärker leidet als andere Baumarten (Ellenberger und Leuscher 2010). Die Fichtensamen sind sehr klein und werden durch den Wind verbreitet. Die Keimung und die Ansamung sind die kritischsten Lebensphasen für eine Fichte, denn die kleinen Samen verfügen nur über wenige Nährstoffreserven (Brang 1996; Schütt et al. 2004). Für die Fichte ist Licht für den Anwuchs sowie die Feuchtigkeit für die Keimung essentiell. Deshalb ist die Niederschlagsinterzeption und damit die Bestandesstruktur ein entscheidender Faktor (Baier et al. 2007). Besonders günstig für die Keimung sind Mineralböden und Moderholz (Hunziker und Brang 2005; LePage 2000; Schütt et al. 2004). Im Münstertal ist die Fichte die häufigste Baumart (Val Müstair 2014), weshalb ihr Fehlen im hier untersuchten Lärchenwald irritiert und diesen Wald besonders macht.

Die Lärche (*Larix decidua*) ist eine sommergrüne Pionierbaumart, deren grösstes zusammenhängendes natürliches Verbreitungsgebiet die Alpen sind. Sie ist wenig konkurrenzstark, nur an äusserst trockenen Standorten kommen reine Lärchenwälder vor. Die Lärche ist aus wirtschaftlichen Gründen sehr beliebt und wird seit Jahrhunderten gefördert, so dass sie gegenüber dem Naturzustand übervertreten ist (Aas 201; Falk et al. 2012; Müller-Stark und Felber 2010). Die Lärche wächst in kontinentalen Klimaregionen auf einem breiten Spektrum von kleinstandörtlichen Bedingungen. Sie bevorzugt tiefgründige tonhaltige Böden und Standorte, welche eine hohe Strahlungsintensität und geringe Luftfeuchtigkeit aufweisen. Sie kann aber auch hohe jährliche Niederschlagssummen ertragen und stellt geringe Ansprüche an den Boden sowie die Nährstoff- und Basenversorgung. Als Pionierbaumart siedelt sie oft auf flachgründigen Böden, wie im untersuchten Lärchenwald, dessen Böden mittel- bis flachgründig sind (Aas 2012; Falk et al. 2012). Die Lärche hat ein meist tiefreichendes Herzwurzelsystem (Aas 2012; Ellenberger und Leuscher 2010). Die Lärche ist frostresistent, sie erträgt schneereiche Winter und braucht nur eine kurze Vegetationsperiode. Sie weist eine hohe Fähigkeit zur Anpassung und zur Regeneration auf und kann dank ihrer Verzweigungs- und Kronenmorphologie rasch auf Umweltbedingungen reagieren (Aas 2012; Falk et al. 2012). Wie die Samen der Fichte verbreiten sich auch die Samen der Lärche durch den Wind. Die Samen sind klein, lediglich 3 bis 5 mm lang. Die Anwuchsphase ist sehr kritisch, da die Lärche als Sämling äusserst empfindlich ist (Senn und Schönberger 2001). Sie keimt vor allem auf Rohböden, auf Streu vertrocknen die schwachen Keimlinge (Ellenberger und Leuscher 2010).

2.2 Feld- und Laborarbeit

Am Untersuchungshang im Lärchenwald und am Kontrollhang im Fichtenwald, wurden in den Beständen jeweils zehn Lücken als Untersuchungsstandorte ausgeschieden (Abbildung 2.3 und Abbildung 2.5). Die Lücken mussten gross genug sein, so dass viel Strahlung einfallen kann, aber nicht zu gross, um das Bestandesklima zu bewahren. Ansonsten wurden sie subjektiv gewählt. Die fünf ersten Lücken wurden unter dem Aspekt der Bodenfeuchtheitsmessung ausgesucht. Aus diesem Grund spielte bei ihrer Wahl der Mikrostandort eine Rolle. Drei der Lücken liegen in Kuppenlage, die übrigen zwei liegen in Muldenlage.

Durch jede der Lücken wurde von oben nach unten ein Transsekt mit jeweils fünf gleichmässig verteilten Plots gelegt. Jeder Plot hat die Form eines Quadrats mit der Kantenlänge von 0.5 m. Zum besseren Verständnis sind die einzelnen Plots mit zwei Zahlen beschrieben. Die erste Zahl steht für die Lücke in welcher sich der Plot befindet, die zweite Zahl steht für die Position innerhalb der Lücke. Der oberste Plot ist der Plot 1, der unterste ist der Plot 5 (Abbildung 2.4). So wird beispielsweise der oberste Plot in der Lücke 2 mit 2_1 bezeichnet. Insgesamt sind es 50 Plots pro Wald. Da die Lücken unterschiedlich gross sind, variiert der Abstand zwischen den Plots. Im Lärchenwald haben die Plots in der kleinsten Lücke 3.2 m Abstand zueinander und in der grössten 8 m. Die Lücken im Fichtenwald sind kleiner und die Plots liegen näher beieinander. Sie haben den Abstand von 2.3 m bis 4.3 m.

Zur Überprüfung der Hypothesen 1 und 2 wurde die Bodenfeuchtigkeit untersucht. Dazu wurden im Lärchenwald zehn und im Fichtenwald zwei Bodenprofile gegraben, angesprochen und Bodenproben gesammelt. Die Bodendaten wurden gemäss dem Protokoll der WSL aufgenommen (Abbildung 8.1 und 8.2 im Anhang). Die Profile liegen in sechs verschiedenen Lücken jeweils am oberen und am unteren Rand. Sie haben die gleiche Bezeichnung wie die Plots auf denen sie sich befinden. An den gesammelten Bodenproben wurde im Labor die Korngrössenverteilung nach Gee et al. (1986) analysiert und mit dem Körnungsdiagramm der Arbeitsgruppe Boden (2005) die Textur bestimmt. Anhand der Mächtigkeit der Horizonte, dem Skelettgehalt und der Skelettgrösse, sowie der Dichte wurde anschliessend die Wasserspeicherkapazität für den ganzen Boden und für die obersten 20 cm des Bodens bei an den verschiedenen Profilen berechnet (Teepe et al. 2003). Letzteres weil für die Verjüngung die Feuchtigkeit im obersten Bereich des Bodens entscheidend ist. Mitte Juni 2013 wurden zur Messung der Saugspannung im Lärchenwald fünf, im Fichtenwald zwei der Profile mit

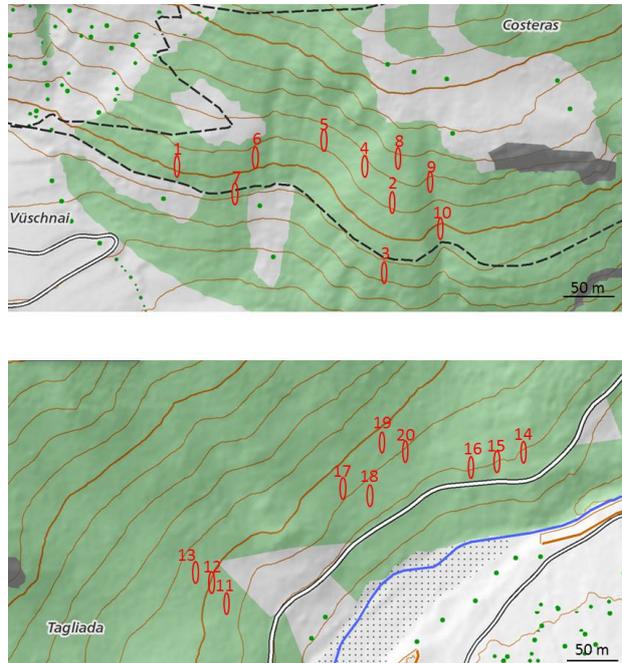


Abbildung 2.3: Lage der Lücken in den beiden Wäldern. Die obere Karte zeigt den Lärchenwald, die untere den Fichtenwald.

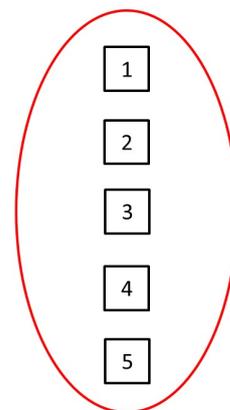


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung einer Lücke und den fünf Plots (MapGeo 2013).

MPS-2 Bodensonden (Decagon Devices, Pullmann, USA) ausgestattet. Die Messstellen haben die gleiche Bezeichnung wie die Profile (Tabelle 2.1). Es wurden pro Messstelle jeweils zwei bis drei Sonden in 10 cm Tiefe und zwei Sonden in 80 cm Tiefe vergraben. Dabei wurden im Lärchenwald zwei Messstellen an den unteren Rändern zweier Lücken in Muldenlage gewählt. In dieser Lage wurden die feuchtesten Verhältnisse erwartet. Eine Messstelle wurde ebenfalls an den unteren Rand einer Lücke jedoch in Kuppenlage und zwei weitere Messstellen wurden an die oberen Ränder zweier Lücken in Kuppenlage gelegt. Am oberen Rand in Kuppenlage wurden die trockensten Verhältnisse erwartet. Im Fichtenwald wurden beide Messstellen in die gleiche Lücke gelegt, eine am oberen und die andere am unteren Rand.

Tabelle 2.1: Lage der Bodenprofile und der MPS-2 Sonden

Profil	Messstelle	Wald	Lücke	Lage in der Lücke	Mikrostandort
Profil 1_1	Messstelle 1_1	Lärchen	Lücke 1	oberer Rand	Kuppe
Profil 1_5		Lärchen	Lücke 1	unterer Rand	
Profil 2_1	Messstelle 2_1	Lärchen	Lücke 2	oberer Rand	Kuppe
Profil 2_5		Lärchen	Lücke 2	unterer Rand	
Profil 3_1		Lärchen	Lücke 3	oberer Rand	
Profil 3_5	Messstelle 3_5	Lärchen	Lücke 3	unterer Rand	Mulde
Profil 4_1		Lärchen	Lücke 4	oberer Rand	
Profil 4_5	Messstelle 4_5	Lärchen	Lücke 4	unterer Rand	Kuppe
Profil 5_1		Lärchen	Lücke 5	oberer Rand	
Profil 5_5	Messstelle 5_5	Lärchen	Lücke 5	unterer Rand	Mulde
Profil 14_1	Messstelle 14_1	Fichten	Lücke 14	oberer Rand	Kuppe
Profil 14_5	Messstelle 14_5	Fichten	Lücke 14	unterer Rand	Hang



(a)



(b)

Abbildung 2.5: (a) Lärchenwald, Lücke 7 (b) Fichtenwald, Lücke 15 (L. Grass) (Fotos weiterer Lücken Abbildung 8.19-8.26 im Anhang).

Um die Hypothese 5 zu testen, wurde die Temperatur an der Bodenoberfläche gemessen. Bei den sieben Messstellen, bei welchen die Bodensonden vergraben worden waren, wurden Temperatursensoren (i-buttons, Maxim Integrated Products DS1922L) ausgelegt, welche die Temperatur von Anfang August bis Anfang November massen. Die Sensoren wurden auf der Bodenoberfläche unter die Vegetation geschoben und so platziert, dass sie nicht direkt von der Sonne bestrahlt wurden. Dies einerseits weil die Bedingungen für

die Verjüngung im Lärchenwald allgemein als schwierig eingeschätzt wurden, weshalb die Verjüngung am ehesten auf leicht beschatteten Mikrostandorten vermutet wurde und andererseits sollte verhindert werden, dass sich der Sensor bei direkter Bestrahlung aufheizt, wodurch zu hohe Temperaturen gemessen würden.

Zur Prüfung der Hypothesen 3 und 4, wurden im September 2013 hemisphärische Fotos zur Modellierung der Intensität der Sonneneinstrahlung und der Sonnenscheindauer auf den verschiedenen Plots aufgenommen (Abbildung 2.6). Die Methode der Lichtmessung mittels hemisphärischer Fotos wurde gewählt, weil damit sowohl die Sonnenscheindauer als auch die direkte und indirekte Strahlung berechnet werden können. Zudem ist es die genaueste Lichtmessungs-Methode (Wagner et al. 2004). Die Fotos wurden mit einer Digitalkamera (Coolpix 4500, Nikon, Tokyo), ausgerüstet mit einer Fischaugenlinse (Nikon FC-E8), aufgenommen. Die Belichtungszeit wurde manuell eingestellt und an die Lichtverhältnisse angepasst, welche zuvor mit einem Belichtungsmesser (Lunasix 3, Gossen, Nürnberg) gemessen worden waren. Es wurden mehrere Bilder bei verschiedener Belichtung aufgenommen. So konnte anschliessend das beste Bild ausgewählt und der Effekt des „Bloomings“ – Kontrastverlust aufgrund von Überbelichtung - minimiert werden, der zu einem zu hohen Wert für die Sonnenintensität führen würde (Zlatanov et al. 2013). Alle Fotos wurden mit der Software Hemisfer 2beta (Schleppi et al. 2007) ausgewertet. Dabei wurden die Bilder nur mit dem blauen Farbkanal analysiert, um den Kontrast zwischen Himmel und Vegetation zu erhöhen. Der Grenzwert wurde für jedes Bild automatisch nach der Methode von Ridler und Calvard (1978) bestimmt.

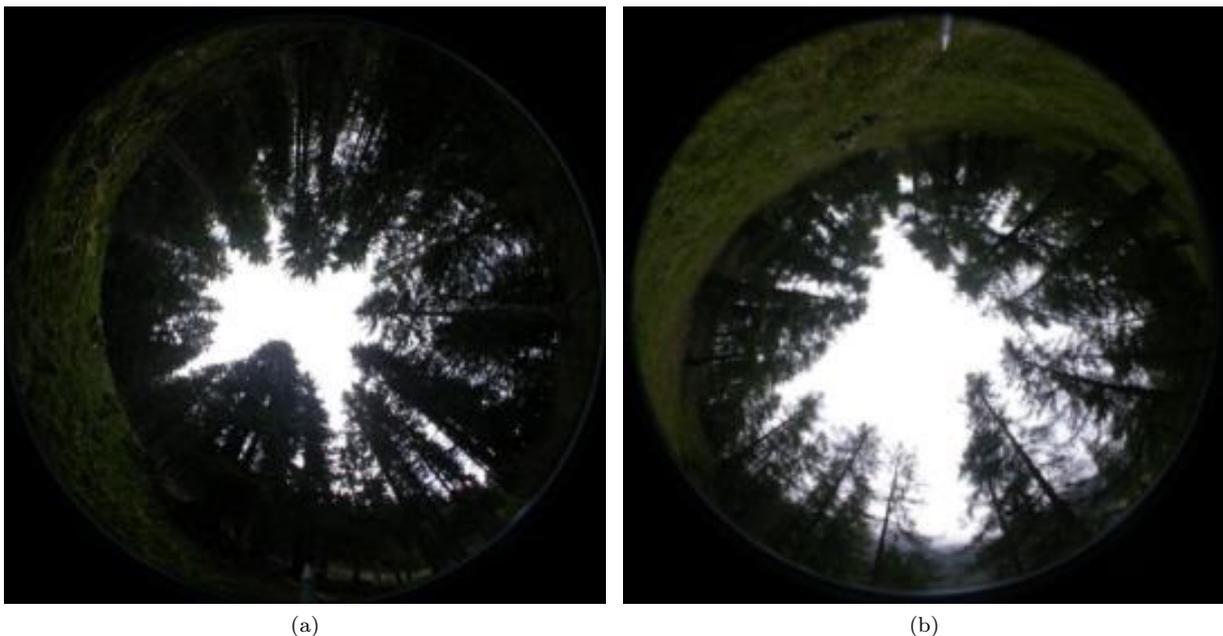


Abbildung 2.6: Hemisphärische Fotos: (a) Fichtenwald, Lücke 11 Plot 5; (b) Lärchenwald, Lücke 5 Plot 4 (L. Grass) (weitere Fotos Abbildung 8.27-8.38 im Anhang).

Die Software modellierte die einfallende direkte und indirekte Strahlung, welche auf die verschiedenen Plots in einer Lücke fallen sowie die Sonnenscheindauer für jeden Tag eines Jahres. Das direkte Licht wird über den Weg der Sonne am Himmel und die Kronenöffnung bestimmt. Das indirekte Licht wird mit Annahmen zur Verteilung des Lichtes als Funktion der Himmelsrichtung berechnet (Rich 1990). Es wird angenommen, dass beide Komponenten jeweils die Hälfte der einfallenden Strahlung ausmachen, wie es über den meisten Wäldern der Erde der Fall ist (Schleppi und Paquette in Druck; Zlatanov et al. 2013).

Um die Strahlungsintensität auf den verschiedenen Plots zu vergleichen, wurde der Gap Light Index (GLI) berechnet. Der GLI ist ein gewichteter Mittelwert aus der direkten und indirekten Strahlung. Er sagt aus, wie viel Prozent der potentiellen Strahlung ausserhalb des Bestandes effektiv in die Lücke fällt (Schleppi

und Paquette in Druck).

$$GLI = [(T_{indirekt}P_{indirekt}) + (T_{direkt}P_{direkt})] * 100 \quad (Canham1988)$$

- $P_{indirekt}$: Proportionalitätsfaktor für Anteil indirekter Strahlung
- P_{direkt} : Proportionalitätsfaktor für Anteil direkter Strahlung
- $P_{indirekt} + P_{direkt} = 1$
- $T_{indirekt}$: Verhältnis effektiver zu potentieller indir. Strahlung
- T_{direkt} : Verhältnis effektiver zu potentieller dir. Strahlung

Der GLI ist ein relativer Wert und kein Mass für die absolute effektive Strahlung. So fällt an trüben Tagen relativ mehr Strahlung in den Bestand, da an sonnigen Tagen die Strahlung ausserhalb des Bestandes sehr hoch ist. So kann der GLI einen grossen Wert annehmen, obwohl die effektive Strahlung klein ist, wenn die potentielle Strahlung sehr klein ist. Für diese Arbeit ist nun interessant, wie viel Strahlung die Verjüngung erreicht. Aus diesem Grund wurde für die Berechnung des GLI nur die Strahlung der Periode genommen, während der die Verjüngung nicht unter einer Schneedecke begraben ist. Die schneefreie Zeit dauert im Münstertal von anfangs Mai bis Ende Oktober (Meteo Schweiz 2013).

Zur Überprüfung der Hypothesen 6 und 7 wurden im September 2013 auf jedem Plot die Mächtigkeit der Streuauflage, die Durchwurzelungsintensität des Oberbodens, der Deckungsgrad und die Biomasse der Bodenvegetation aufgenommen. Zur Abschätzung der Durchwurzelungsintensität wurde mit einem Spaten Boden abgestochen und für die obersten 10 cm des Bodens vier Durchwurzelungs-Kategorien bestimmt (Abbildung 2.7). Die Kategorien (Tabelle 2.2) richten sich nach der Beschreibung der Durchwurzelungsintensität des Boden-Aufnahmeprotokolls der WSL.

Tabelle 2.2: Kategorien der Durchwurzelungsintensität

Kategorie 1:	kaum Wurzeln	0-5 Stück auf einer Fläche von 10 mal 10 cm
Kategorie 2:	wenig Wurzeln	6-10 Stück auf einer Fläche von 10 mal 10 cm
Kategorie 3:	viel Wurzeln	11-50 Stück auf einer Fläche von 10 mal 10 cm
Kategorie 4:	dichter Wurzelfilz	> 50 Stück auf einer Fläche von 10 mal 10 cm



(a) Plot 1, Lücke 4

(b) Plot 4, Lücke 2

(c) Plot 4, Lücke 1

(d) Plot 5, Lücke 5

Abbildung 2.7: Fotos der Kategorien 1 bis 4 von links nach rechts in aufsteigender Reihenfolge (L. Grass) (weitere Fotos der Durchwurzelung Abbildung 8.39-8.46 im Anhang).

Für die Aufnahme des Deckungsgrades wurde jeder Plot in Quadrate von 10 cm mal 10 cm unterteilt, auf welchen der Deckungsgrad aufgenommen wurde. Anschliessend wurden die Werte der kleineren Quadrate zum Gesamtdeckungsgrad des Plots aufsummiert. Der Deckungsgrad der Bodenvegetation wurde für die krautige Bodenvegetation alleine ohne Moos und für die Bodenvegetation inklusiv Moos geschätzt. Für die Messung der Biomasse wurde die Bodenvegetation bodeneben abgeschnitten, gesammelt und zwei Tage bei 60 C getrocknet. Mit einer Laborwaage die auf 0.01 g genau misst, wurde das Trockengewicht der Bodenvegetation bestimmt. Die Biomasse wurde für die krautige Bodenvegetation alleine und für die Bodenvegetation inklusiv Moos bestimmt (Abbildung 8.47-8.54 im Anhang).

2.3 Bodenwasser-Modell

Mit einem Wasserbilanz-Modell (Cailleret 2014) wurden die Intensität und die Dauer der Trockenheit in den beiden Waldbeständen simuliert (R-Code des Modells im Kapitel 8.2.1 im Anhang). Das Modell rechnete mit der potentiellen Evapotranspiration, welche über Globalstrahlung ermittelt wurde, sowie mit den Niederschlagsdaten und der Wasserspeicherkapazität des Bodens. Es wurde angenommen, dass Wasserstress auftritt, sobald das relativ nutzbare Bodenwasser (REW) unter den Grenzwert von 0.4 fällt (Granier et al. 1999). REW ist das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen und dem maximal nutzbaren Bodenwasser. Das maximal nutzbare Bodenwasser stellt die Differenz zwischen der Feldkapazität und dem Welkepunkt dar. Wird der Grenzwert von 0.4 unterschritten, schliessen die Bäume ihre Stomatas und stellen das Wachstum ein (Granier et al. 2007).

Die Dauer der Trockenheit ist die Anzahl der Tage, an welchen REW kleiner als 0.4 ist. Basierend auf diesem Grenzwert wurde für die Intensität der Trockenheit ein Trockenheitsindex (DrI) berechnet, welcher die Fläche unter 0.4 über die Dauer darstellt. DrI liegt zwischen 0 und 1. Die Bäume sind von Trockenheit betroffen, wenn der DrI grösser als 0 ist und bei einem Trockenheitsindex von 0.4 bis 0.5 ist die trockene Waldgrenze erreicht (Bugmann und Cramer 1998; Bugmann und Solomon 2000; Bugmann 2013). Das Modell wurde mit den Wetterdaten vom Dezember 2011 bis Januar 2014 der Klimastation Sta. Maria gerechnet (Meteo Schweiz 2014). Da keine längere Zeitreihe der Klimadaten der Station Sta. Maria vorhanden ist, konnte kein langfristiges Modell gerechnet werden. Für die Wasserspeicherkapazität wurde der Wert des ganzen Bodens und nicht nur der Wert der obersten 20 cm des Bodens genommen. Denn hier geht es nicht um die Verjüngungsgunst des Standorts, sondern darum, ob die trockene Waldgrenze erreicht wird. Würde mit der Wasserspeicherkapazität der obersten 20 cm des Bodens gerechnet werden, die bedeutend geringer ist, würden die berechneten Trockenheitsindices deutlich zu hohe Werte annehmen.

2.4 Statistische Auswertung

Zur statistischen Auswertung wurde das Statistik Programm 'R' (R Development Core Team 2011) verwendet (R-Code der statistischen Auswertung im Kapitel 8.2.2 im Anhang). Alle statistischen Tests wurden mit einem Signifikanzniveau von 5 % gerechnet.

2.4.1 Signifikanzanalyse

Die vorliegenden Daten sind nicht normalverteilt, weshalb für die Untersuchung der Signifikanz nicht-parametrische Tests verwendet wurden. Es wurde untersucht, ob sich die verschiedenen Verjüngungsfaktoren in den beiden Wäldern und auf den fünf verschiedenen Plots unterscheiden. Für die Daten der direkten, beziehungsweise indirekten Strahlung und der Sonnenscheindauer, wurde mit dem Jahresmittelwert pro Plot

gerechnet, denn die meisten Tests gehen davon aus, dass die Daten unabhängig sind. In diesem Fall sind die Daten innerhalb eines Plots jedoch zeitlich autokorreliert, wodurch die p-Werte zu klein geschätzt würden. Für den Vergleich der beiden Wälder wurden der Wilcoxon-Rangsummentest wie auch der Chiquadrat-Test verwendet. Für numerische Daten wurde der Wilcoxon-Rangsummentest und für die Daten der Wurzelkonkurrenz, welche als Faktoren vorliegen, der Chiquadrat-Test verwendet. Um die Signifikanz zwischen den verschiedenen Plots zu untersuchen, wurden ein Kruskal-Wallis-Test für numerische Daten, respektive ein Chiquadrat-Test für Faktoren durchgeführt. Mit diesem Test lässt sich berechnen, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Plots gibt. Für jene Daten, welche einen signifikanten Unterschied zwischen den Plots aufweisen, wurde anschliessend ein multipler Test nach Kruskal-Wallis (Giraudoux 2013) durchgeführt, um genau festzustellen zwischen welchen Plots der Unterschied besteht. Dieser Test prüft alle Kombinationen von Gruppen auf Unterschiede bei einem bestimmten Signifikanzniveau (hier 5 %), er berechnet jedoch keine genauen p-Werte.

2.4.2 Linear-mixed-effect-Model

Für die Verjüngung liegen keine Daten vor, weshalb angenommen wurde, dass es im Lärchenwald generell keine Verjüngung gibt (anders als im Fichtenwald). Da für die Zielvariable Verjüngung binäre Werte vorliegen, wurde mit einer Binomialverteilung gerechnet. Mit einem Linear-mixed-effect-Model (Bates et al. 2013) wurde der Effekt der verschiedenen Faktoren auf die Verjüngung untersucht. Dieses Modell berücksichtigt zusätzlich zu den fixen Effekten, auch zufällige Effekte. Es wurde ein volles Modell simuliert, bei dem alle Verjüngungsfaktoren (GLI, Streu, Deckungsgrad und Biomasse der Bodenvegetation und Durchwurzelungsintensität) den fixen Effekt darstellten. Zudem wurden verschiedene Variationen des Modelles berechnet, indem die Verjüngungsfaktoren in unterschiedlichen Kombinationen als fixe Effekte definiert wurden. Jedes Modell wurde mit den Lücken als zufälliger Effekt gerechnet.

3 Resultate

3.1 Feldbeobachtungen

Der Lärchenwald steht an einem steilen Hang mit einer Neigung von 69 % bis 91 % (Tabelle 3.1). Die Böden sind Rohböden - zum Teil flachgründig und sehr skeletthaltig. Der Tonanteil ist klein und der Sandanteil gross, weshalb die Bindigkeit gering ist (Tabelle 8.5 im Anhang). Der Boden ist trocken und wird kaum durch die Bodenbedeckung zusammengehalten, er ist sehr locker. Die Lagerungsdichte beträgt zwischen 0.6 g/cm^3 und 2.32 g/cm^3 . Es ist ein saurer Boden, die pH-Werte in den obersten 20 cm liegen zwischen 3.5 und 5.5. Die durchschnittliche Basensättigung der obersten 20 cm variiert zwischen 31.9 % und 96.4 % und die Kationenaustauschkapazität beträgt zwischen 62.4 mmolc/kg und 130.6 mmolc/kg (Tabelle 8.2 und 8.4 im Anhang). Es ist ein lichter Wald, ein grosser Teil des Bodens ist von Gras bewachsen (Abbildung 3.1). Besonders die Lücke 5 hat einen sehr dichten Grasteppich (Abbildung 8.22 im Anhang). Einzig die beiden Lücken 2 und 4 sind spärlich bewachsen. Speziell die Lücke 4 hat kaum Bodenvegetation, hier wird der Boden von Xeromoder bedeckt (Abbildung 8.21 im Anhang). Im ganzen Lärchenwald wurde auf dem Boden kein Moos gefunden. Moos kam höchstens spärlich auf Totholz und auf Fels vor. Der Deckungsgrad und die Biomasse der krautigen Bodenvegetation ohne Moos sind im Lärchenwald signifikant höher als im Fichtenwald (Abbildung 3.3).



Abbildung 3.1: Lärchenwald: Von der Lücke 3 in Richtung Lücke 5 (M. Walser, WSL).

Hingegen unterscheidet sich die Durchwurzelungsintensität der beiden Hänge nicht und weder die Biomasse noch der Deckungsgrad der Bodenvegetation inklusiv Moos sind in den beiden Wäldern signifikant unterschiedlich (Abbildung 8.66 im Anhang). Im Lärchenwald hat es signifikant mehr Streu als im Fichtenwald (Abbildung 3.5). Auch die verschiedenen Plots unterscheiden sich sowohl im Lärchen- als auch im Fichtenwald signifikant in der Mächtigkeit der Streuauflage. Im Lärchenwald haben über alle Lücken gesehen die Plots 1 signifikant mehr Streu als die Plots 2 und 4 (Tabelle 8.12 im Anhang). Beim Begehen des Waldes und gezielter Suche nach Verjüngung, wurden nur Keimlinge und Anwuchs von höchstens 15 cm Höhe gefunden. Diese wuchsen auf dem Wurzelteller einer umgefallenen Lärche oder auf freigelegter Mineralerde, ein Keimling befand sich im Bestand auf Moderholz. Es sind offensichtlich wenige keimungsfreundliche Kleinstandorte vorhanden, eine Etablierung der Verjüngung gelingt jedoch nicht.

Tabelle 3.1: Lageparameter und Bodenvegetation der zehn Lücken im Lärchenwald. Der Deckungsgrad ist der durchschnittliche Deckungsgrad der fünf Plots pro Lücke. Tendenziell ist der hier angegebene Wert geringer als der tatsächliche Deckungsgrad der ganzen Lücke (Daten zur Bodenvegetation Tabelle 8.12-8.16 im Anhang).

	Lückengrösse	Steigung	Höhe über Meer	Deckungsgrad Bodenvegetation
Lücke 1	28 m	68 %	1500 müM	69 %
Lücke 2	17 m	88 %	1510 müM	24 %
Lücke 3	15 m	90 %	1480 müM	43 %
Lücke 4	13 m	88 %	1530 müM	5 %
Lücke 5	26 m	82 %	1540 müM	96 %
Lücke 6	18 m	69 %	1520 müM	89 %
Lücke 7	20 m	79 %	1480 müM	88 %
Lücke 8	32 m	74 %	1550 müM	55 %
Lücke 9	20 m	91 %	1550 müM	72 %
Lücke 10	16 m	91 %	1500 müM	74 %

Der Fichtenwald ist mit 26 % bis 67 % Steigung deutlich weniger steil als der Lärchenwald (Tabelle 3.2). Auch im Fichtenwald ist der Boden skeletthaltig und nicht sehr tiefgründig. Am oberen Rand in der Lücke 14 war der Boden nur 35 cm tief und durch Fels begrenzt. Der Boden hat wie schon im Lärchenwald einen geringen Ton- und einen hohen Sandanteil. Er ist jedoch feuchter als der Boden im Lärchenwald und wird von der Bodenbedeckung stärker zusammengehalten. Die Lagerungsdichte beträgt 0.84 g/cm^3 beziehungsweise 1.2 g/cm^3 . Der Boden ist wie schon im Lärchenwald sauer. Die pH-Werte in den obersten 20 cm des Bodens liegen zwischen 3 und 3.4. Die durchschnittliche Basensättigung beträgt 40% und 43.7% und die Kationenustauschkapazität 182.6 mmolc/kg und 301.8 mmolc/kg (Tabelle 8.2 und 8.4 im Anhang). Der Fichtenwald ist deutlich dichter bestockt als der Lärchenwald. In der Bodenvegetation sind vor allem Zwergsträucher vertreten und weniger Gräser als im Lärchenwald. Ein grosser Teil des Bodens ist von Moos bewachsen, meist der untere Bereich der Lücken. So ist auch in der Lücke 14 die untere Hälfte stark bewachsen, der obere Bereich ist jedoch frei von Bodenvegetation. Der Deckungsgrad und die Biomasse inklusiv Moos unterscheiden sich zwischen den Plots signifikant (Abbildung 3.4). Über alle Lücken haben die Plots 4 und 5 signifikant mehr Biomasse als die Plots 1 und die Plots 3 bis 5 haben einen signifikant höheren Deckungsgrad als die Plots 1. Auch die krautige Bodenvegetation ohne Moos und die Durchwurzelungsintensität sind auf den obersten Plots am geringsten, jedoch nicht signifikant (Tabellen 8.12-8.16 im Anhang). Dafür haben die Plots 1 signifikant mehr Streu als die Plots 3, 4 und 5. Im Fichtenwald gibt es viel Verjüngung. Am häufigsten sind Fichtenverjüngungen, es kommen aber auch Lärchen- und Föhrenverjüngung vor. Die Verjüngung wächst vor allem in der Mitte und in der untern Hälfte der Lücken, in der oberen Hälfte wurde weniger Verjüngung gefunden und am oberen Rand keine.

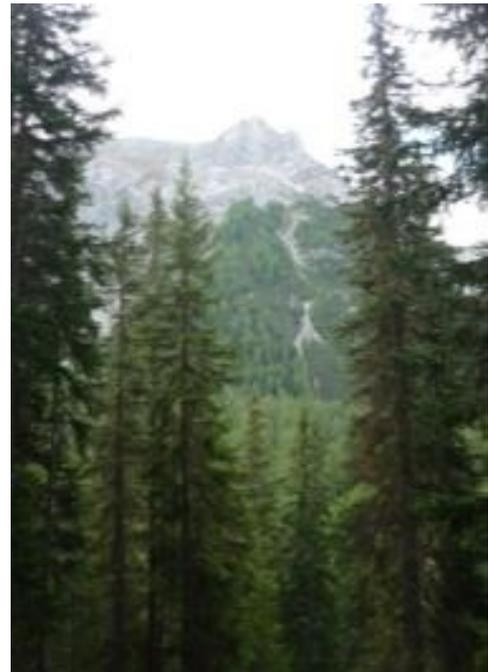


Abbildung 3.2: Foto aus dem Fichtenwald (L. Grass).

Tabelle 3.2: Lageparameter und Bodenvegetation der zehn Lücken im Lärchenwald. Der Deckungsgrad ist der durchschnittliche Deckungsgrad der fünf Plots pro Lücke. Tendenziell ist der hier angegebene Wert geringer als der tatsächliche Deckungsgrad der ganzen Lücke (Daten zur Bodenvegetation Tabellen 8.12-8.16 im Anhang).

	Lückengrösse	Höhe über Meer	Steigung	Deckungsgrad	
				inkl. Moos	Bodenvegetation ohne Moos
Lücke 11	15 m	1780 müM	53 %	36 %	16 %
Lücke 12	17 m	1800 müM	56 %	36 %	20 %
Lücke 13	12 m	1810 müM	67 %	38 %	17 %
Lücke 14	14 m	1770 müM	37 %	35 %	32 %
Lücke 15	14 m	1770 müM	36 %	15 %	15 %
Lücke 16	9 m	1770 müM	26 %	82 %	40 %
Lücke 17	12 m	1790 müM	67 %	71 %	38 %
Lücke 18	12 m	1780 müM	62 %	3 %	3 %
Lücke 19	12 m	1800 müM	51 %	14 %	7 %
Lücke 20	12 m	1790 müM	48 %	55 %	44 %

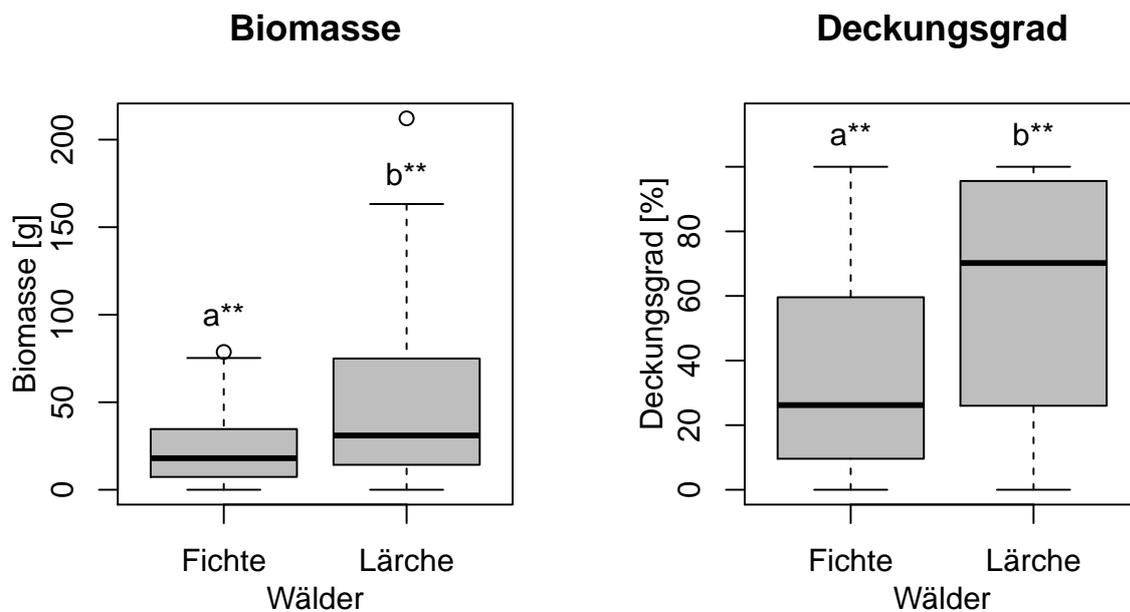


Abbildung 3.3: Vergleich der Biomasse und des Deckungsgrads der Bodenvegetation zwischen den beiden Wäldern. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das 25 %, respektive das 75 % Quantil, die vertikalen Striche das Maximum respektive das Minimum und die Kreise die Ausreisser. Die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$

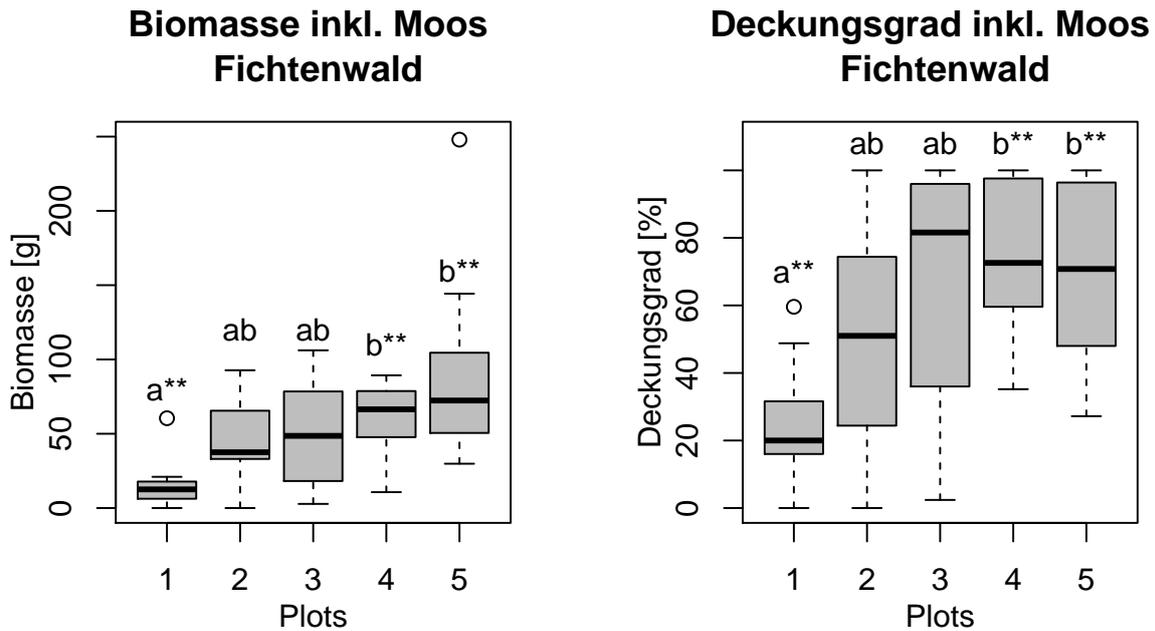


Abbildung 3.4: Vergleich Biomasse und Deckungsgrad der Bodenvegetation inklusiv Moos zwischen den Plots im Fichtenwald. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das 25 %, respektive das 75 % Quantil, die vertikalen Striche das Maximum, respektive das Minimum und die Kreise die Ausreißer. Die Ergebnisse des Kruskal-Wallis -Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$

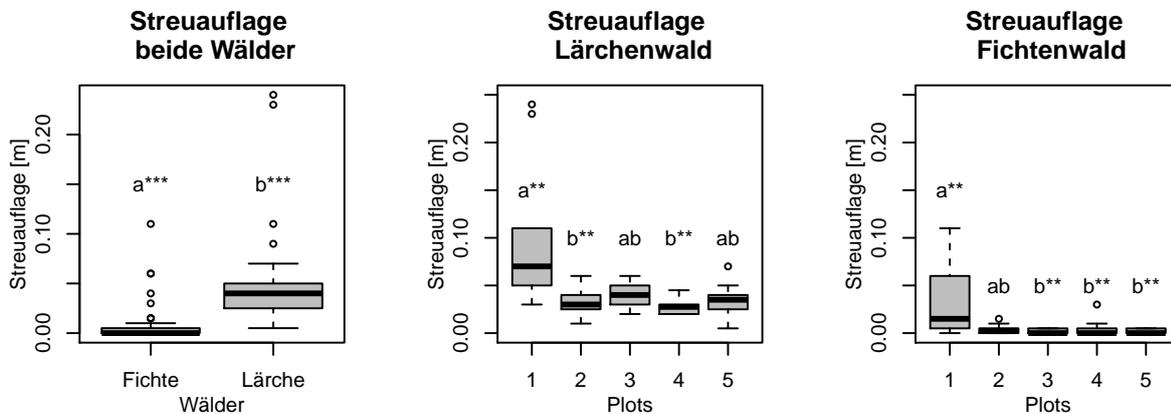


Abbildung 3.5: Vergleich der Mächtigkeit der Streuauflage zwischen den beiden Wäldern und zwischen den fünf Plots. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das 25 %, respektive das 75 % Quantil, die vertikalen Striche das Maximum, respektive das Minimum und die Kreise die Ausreißer. Die Ergebnisse des Wilcoxon-, beziehungsweise des Kruskal-Wallis-Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$

3.2 Licht

Bei der Betrachtung der täglichen direkten Strahlung über das Jahr ist eine starke räumliche Variabilität zu erkennen (Abbildung 3.7 und 3.8). Der Jahresverlauf der Strahlung weicht zwischen den Lücken, aber auch innerhalb der Lücken zwischen den Plots, voneinander ab. Allen Plots gemein ist, dass im Sommer deutlich mehr direkte Strahlung den Boden erreicht als im Winter. Sowohl die Energiemenge als auch die Dauer der direkten Strahlung und die indirekte Strahlung sind im Sommer höher als im Winter. Die Sonnenscheindauer und die Strahlung haben nicht den gleichen Verlauf über das Jahr (Abbildung 8.55-8.58 im Anhang). Der Jahresdurchschnitt pro Plot der direkten-, respektive der indirekten Strahlung und der Sonnenscheindauer der beiden Wälder unterscheiden sich signifikant. Es fällt deutlich mehr Strahlung in die Lücken des Lärchenwalds (Abbildung 3.6). Dafür gibt es weder im Lärchen- noch im Fichtenwald einen signifikanten Unterschied zwischen den Plots innerhalb eines Waldes (Abbildung 8.59 im Anhang).

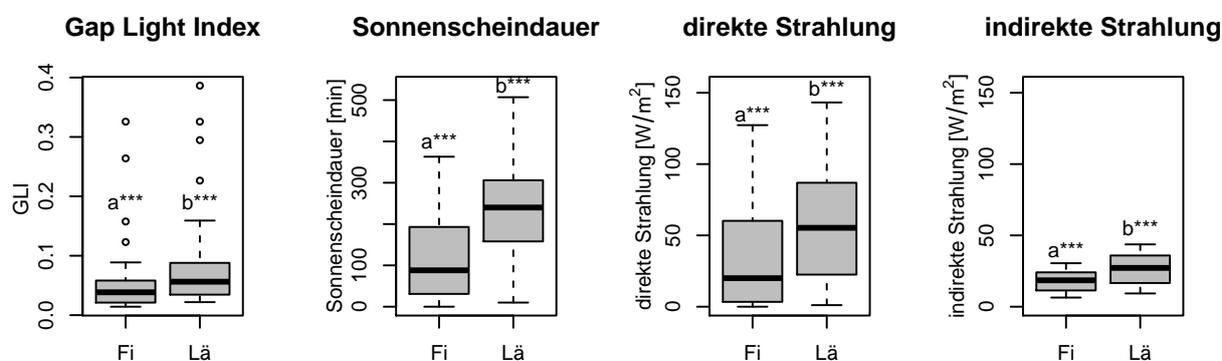


Abbildung 3.6: Vergleich der Lichtverhältnisse zwischen den beiden Wäldern. Fi = Fichtenwald, Lä = Lärchenwald. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das 25 %, respektive das 75 % Quantil, die vertikalen Striche das Maximum, respektive das Minimum und die Kreise die Ausreisser. Die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$

Im Lärchenwald erhalten die obersten Plots am nördlichen Ende der Bestandeslücke nie am meisten direkte Strahlung. Oft werden die mittleren Plots 2 bis 4 am stärksten besonnt. Es ist zu beobachten, dass die tägliche Sonnenscheindauer auf gewissen Plots des Lärchenwaldes vom Frühling gegen den Hochsommer abnimmt und gegen Herbst wieder zunimmt. In der Lücke 6 sinken die direkte Strahlung und die Sonnenscheindauer auf dem Plot 6_1 im Sommer stark. Auch im Fichtenwald haben die mittleren Plots oft am meisten Strahlung, anders als im Lärchenwald erhalten jedoch zum Teil auch die obersten Plots am meisten direkte Strahlung. Die untersten Plots erhalten fast immer am wenigsten Strahlung.

Wie in Abbildung 3.6 dargestellt, ist auch der Gap Light Index (GLI), eine von der direkten und der indirekten Strahlung abgeleitete Größe, im Lärchenwald signifikant größer als im Fichtenwald. Es fällt also im Verhältnis zur potentiellen Strahlung effektiv mehr Strahlung in den Lärchenwald als in den Fichtenwald. Beim Vergleich des GLI in den beiden Wäldern muss jedoch beachtet werden, dass die potentielle Strahlung sich zum Teil zwischen den Lücken und zwischen den Wäldern unterscheidet. Besonders die potentielle indirekte Strahlung variiert stark (Abbildung 8.60-8.63 im Anhang). Der Unterschied des GLI innerhalb eines Waldes zwischen den verschiedenen Plots ist weder im Lärchen- noch im Fichtenwald signifikant.

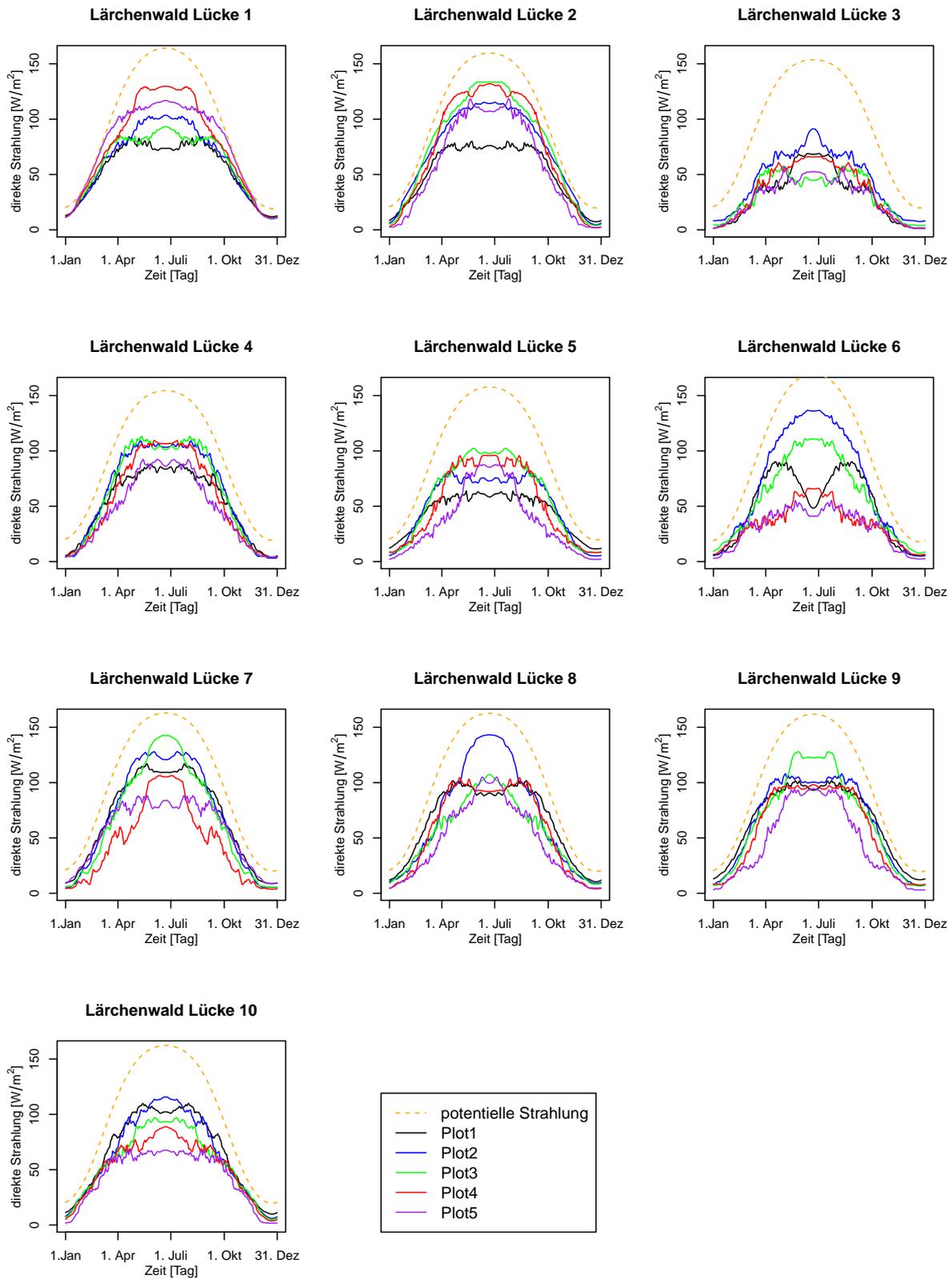


Abbildung 3.7: tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) direkte Strahlung pro m^2 im Hang des Lärchenwaldes über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.

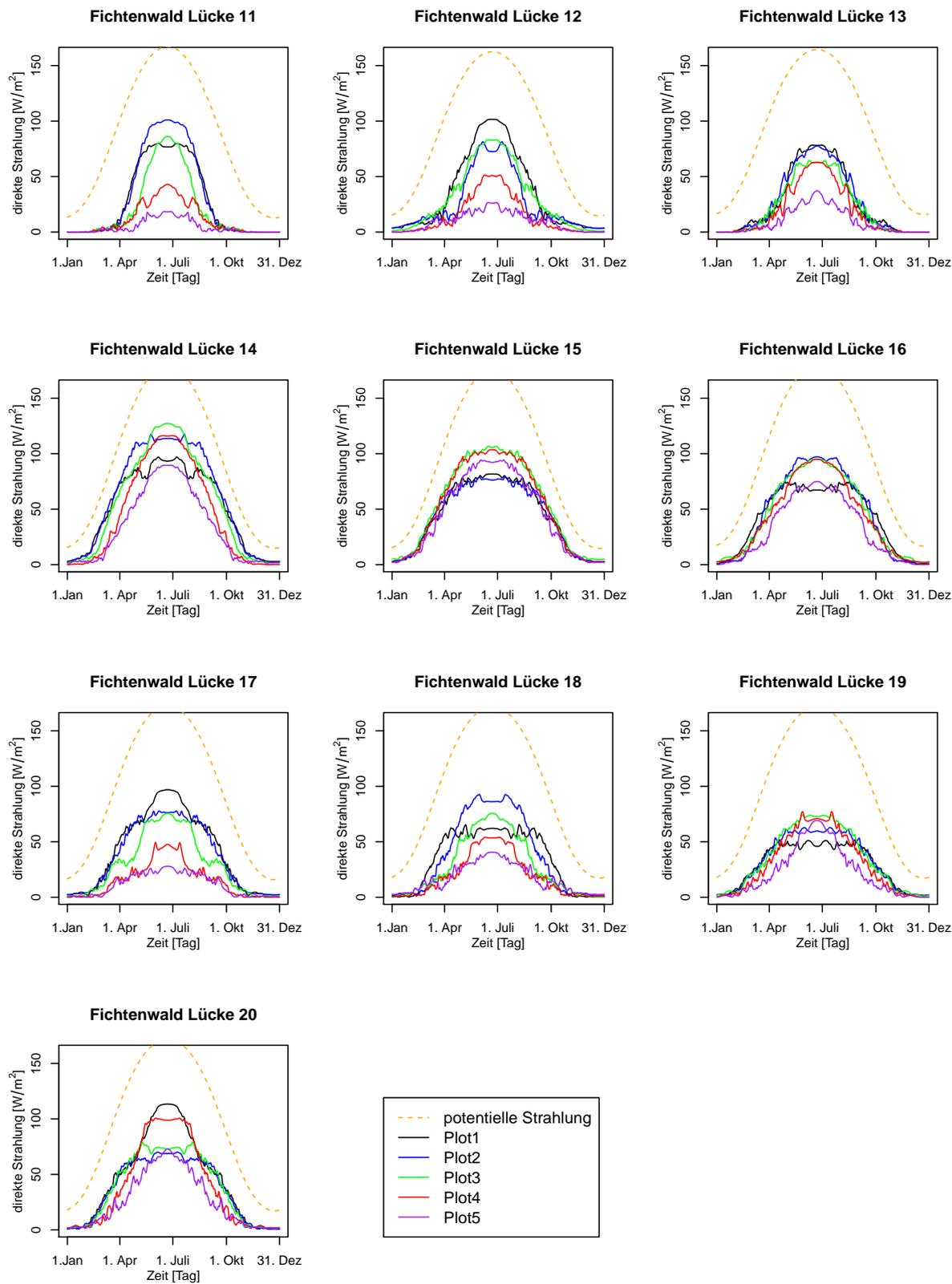


Abbildung 3.8: tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) direkte Strahlung pro m^2 im Hang des Fichtenwaldes über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.

3.3 Temperatur

Die räumliche Variabilität der Temperatur an der Bodenoberfläche ist gross. Selbst innerhalb einer Messstelle haben die Temperatursensoren unterschiedliche Temperaturen gemessen. Der zeitliche Verlauf der Temperatur ist innerhalb einer Messstelle zwar ähnlich, aber die Höhe der Temperaturen kann voneinander abweichen (Abbildung 3.9). Von August bis Mitte September lagen die Temperaturen im Lärchen-, sowie im Fichtenwald meistens zwischen 10-30°C und sanken gegen November auf 0-20 C, aber nie unter den Nullpunkt. Die Temperatur konnte innerhalb kurzer Zeit stark schwanken, bei einzelnen Messstellen traten Spitzentemperaturen von über 40°C auf. Im Fichtenwald wurden durchschnittlich tiefere Temperaturen gemessen als im Lärchenwald. Ebenso wurden im Fichtenwald – wie erwähnt - durchschnittlich tiefere Strahlungswerte gemessen, zudem liegt der Fichtenwald 200 m höher als der Lärchenwald.

Tabelle 3.3: Durchschnitt aller gemessenen Temperaturwerte und der Durchschnitt der 10 % höchsten Temperaturwerten bei den sieben Messstellen.

	durchschnittliche Temperatur	Durchschnitt der 10 % höchsten Temperaturen
Messstelle 1_1	12.96 °C	26.59 °C
Messstelle 2_1	14.62 °C	35.46 °C
Messstelle 3_5	11.75 °C	27.12 °C
Messstelle 4_5	11.24 °C	23.03 °C
Messstelle 5_5	11.11 °C	21.31 °C
Messstelle 14_1	10.67 °C	29.71 °C
Messstelle 14_5	9.40 °C	20.36 °C

Durchschnittlich waren die Temperaturen am unteren Rand der Lücken tiefer als jene am oberen Rand (Tabelle 3.3). Für den direkten Vergleich des oberen Rands mit dem unteren Rand wurden die Messstellen 2_1 und 4_5 im Lärchenwald gewählt. Diese haben dieselbe Exposition, Steigung, Höhe über Meer und auch die Lückengrösse ist ähnlich. Der einzige Unterschied ist die Lage innerhalb der Lücken. Die Messstelle 2_1 liegt am oberen Rand und 4_5 am unteren. Dies macht diese beiden Messstellen ideal für den Vergleich des oberen Rands mit dem unteren Rand. Die Messstelle 2_1 hat mit 14.6 °C die höchste Durchschnittstemperatur von allen Messstellen. 4_5 ist mit 11.2 °C im Durchschnitt mehr als drei Grad kälter als 2_1. Der Durchschnitt der 10% höchsten Temperaturen von 2_1 liegt fast 12 Grad über jenem von 4_5. Der Durchschnitt der 10 % höchsten Temperaturen wurde berechnet, da Hitzestress in alpinen Regionen auftreten kann (Körner 2003), für welchen die höchsten Temperaturen und nicht die durchschnittliche Temperatur entscheidend ist. Es wurde jedoch auch nicht einfach die Maximalwerte pro Messstelle betrachtet, diese könnten Ausreisser sein.

Die Strahlung ist bei der Messstelle 2_1 leicht höher und sie wird durchschnittlich eine halbe Stunde länger direkt besonnt als 4_5 (Tabelle 8.9 im Anhang). Für einen weiteren direkten Vergleich wurden die beiden Messstellen 14_1 und 14_5 im Fichtenwald betrachtet. Da sie in der gleichen Lücke nur etwa zehn Meter auseinander liegen, sind sie für den direkten Vergleich ideal. Einzig die Mikrostandorte unterscheiden sich. Die Messstelle 14_1 liegt auf einer Kuppe, während sich 14_5 in Hanglage befindet. Bei 14_1 wurde eine Durchschnittstemperatur von 10.6 °C gemessen, welche mehr als ein Grad höher als jene von 14_5 ist. Zudem ist der Durchschnitt der 10 % höchsten Temperaturen mehr als neun Grad höher als jener bei der Messstelle 14_5. Die Sonnenscheindauer, sowie die direkte Strahlung sind bei der Messstelle 14_1 höher als bei 14_5. Zudem fehlt bei der Messstelle 14_1 die Bodenvegetation, welche den Boden beschattet.

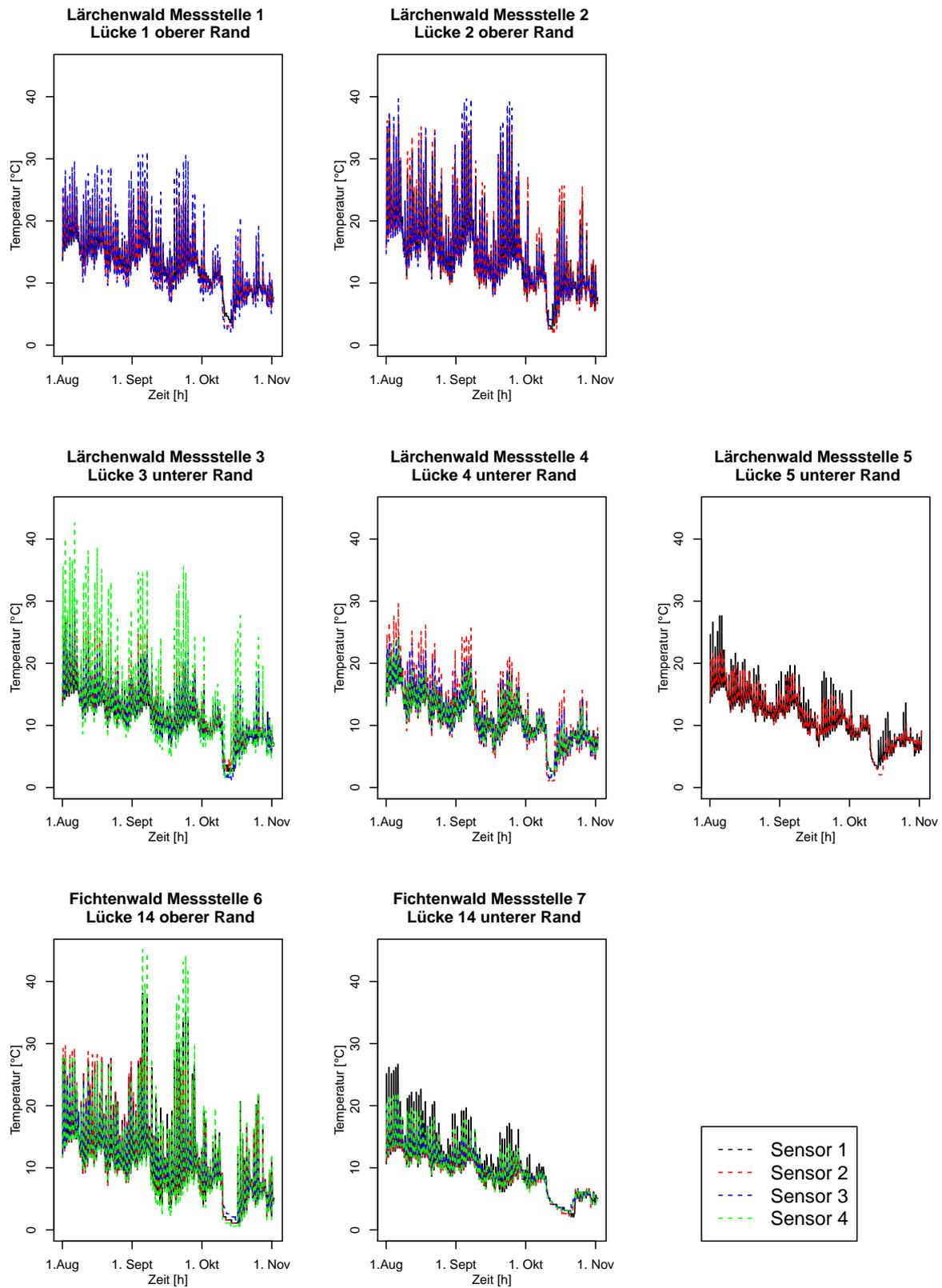


Abbildung 3.9: Temperatur auf dem Boden bei den sieben Profilen, von August bis November. Die verschiedenen Farben zeigen die Messungen der verschiedenen Temperatursensoren bei der gleichen Messstelle.

3.4 Bodenwasserhaushalt

Die Wasserspeicherkapazität des Bodens unterscheidet sich je nach Profil stark, zum Teil sogar innerhalb einer Lücke. So ist die Wasserspeicherkapazität der obersten 20 cm in der Lücke 14 im Fichtenwald am oberen Rand bei 14_1 nur halb so gross wie am unteren Rand bei 14_5 (Tabelle 3.4). Im Durchschnitt ist die Wasserspeicherkapazität im Fichtenwald geringer als im Lärchenwald.

Tabelle 3.4: Wasserspeicherkapazität (WSpK) bei den zwölf Profilen

Profil	Messstelle	Wald	Lücke	Lage in der Lücke	WSpK oberste 20 cm	WSpK ganzer Boden
Profil 1_1	Messstelle 1_1	Lärchen	Lücke 1	oberer Rand	21 mm	53 mm
Profil 1_5		Lärchen	Lücke 1	unterer Rand	38 mm	83 mm
Profil 2_1	Messstelle 2_1	Lärchen	Lücke 2	oberer Rand	38 mm	99 mm
Profil 2_5		Lärchen	Lücke 2	unterer Rand	42 mm	104 mm
Profil 3_1		Lärchen	Lücke 3	oberer Rand	36 mm	48 mm
Profil 3_5	Messstelle 3_5	Lärchen	Lücke 3	unterer Rand	42 mm	39 mm
Profil 4_1		Lärchen	Lücke 4	oberer Rand	45 mm	128 mm
Profil 4_5	Messstelle 4_5	Lärchen	Lücke 4	unterer Rand	36 mm	129 mm
Profil 5_1		Lärchen	Lücke 5	oberer Rand	30 mm	219 mm
Profil 5_5	Messstelle 5_5	Lärchen	Lücke 5	unterer Rand	25 mm	86 mm
Profil 14_1	Messstelle 14_1	Fichten	Lücke 14	oberer Rand	14 mm	18 mm
Profil 14_5	Messstelle 14_5	Fichten	Lücke 14	unterer Rand	29 mm	51 mm

Die Saugspannung unterscheidet sich zwischen den Messstellen stark. Selbst innerhalb einer Messstelle wurden unterschiedliche Saugspannungen gemessen (Abbildung 3.10).

Der Verlauf der Saugspannung während der Messperiode in 10 cm Tiefe ist ähnlich wie jener in 80 cm. Generell ist die Saugspannung in 80 cm Tiefe jedoch weniger negativ als in 10 cm und schwankt weniger (Abbildung 8.64 im Anhang). Für die Verjüngung ist die Feuchtigkeit im obersten Bereich des Bodens wichtig, weshalb in der weiteren Analyse nur auf die Feuchtigkeit in 10 cm Tiefe eingegangen wird.

Die Messungen der Saugspannungen ergaben, dass der Boden im Lärchenwald trockener ist als der Boden im Fichtenwald. Auch die Messstellen im Lärchenwald, welche am unteren Lückenrand in Muldenlage liegen, sind trockener als jene im Fichtenwald in Kuppenlage. Im Lärchenwald fällt mehr Strahlung in die Lücken, ausserdem sind die Öffnungen der Lücken grösser.

Für den Vergleich der Bodenfeuchtigkeit am oberen Rand mit derjenigen am unteren Rand wurden wieder die gleichen Messstellen wie bei der Temperatur gewählt. Die Saugspannung am oberen Rand in der Lücke 2 schwankt stärker als jene am untern Rand in der Lücke 4, der Verlauf ist jedoch vergleichbar, die Maxima und Minima stimmen zeitlich überein. Am oberen Rand treten deutlich trockenere Verhältnisse auf, die Saugspannung sinkt unter den Welkepunkt. Am untern Rand sinkt sie nie unter den Welkepunkt. Die Wasserspeicherkapazität bei den Messstellen 2_1 und 4_5 ist ähnlich. Die durchschnittliche Temperatur und der Durchschnitt der 10 % höchsten Temperaturen sind bei der Messstelle 2_1 höher als bei 4_5 (Tabelle 3.3). Auch die direkte Strahlung ist leicht höher (Tabelle 8.9 im Anhang). Die Messstelle 2_1 wird leicht überschirmt und ist von Interzeption betroffen. Ausserdem sind der Deckungsgrad und die Biomasse der Bodenvegetation bei der Messstelle 2_1 deutlich höher als bei 4_5 (Tabelle 8.11 im Anhang). Auch im Fichtenwald sind am oberen Rand trockenere Verhältnisse zu finden als am unteren Rand. Jedoch ist der Unterschied weniger gross als im Lärchenwald und die Saugspannung sinkt weder am oberen noch am

unteren Rand unter den Welkepunkt. Die Messstelle 14_1 liegt auf einer Kuppe, während die Messstelle 14_5 am Hang liegt. Zudem ist die Wasserspeicherkapazität bei 14_1 halb so grosse wie jene bei 14_5. Die durchschnittliche Temperatur ist bei der Messstelle 14_1 mehr als ein Grad höher als bei 14_5, die durchschnittliche Temperatur der 10 % höchsten Werte ist sogar um 9 Grad höher. Auch die direkte Strahlung und die Sonnenscheindauer sind bei der Messstelle 14_1 höher. Beide Messstellen haben keine Interzeption und 14_1 hat keine Bodenvegetation.

Für die Messstellen 3_5 und 5_5 ist ein Vergleich verschiedener Parameter besonders interessant, denn bei der Betrachtung der Saugspannung fallen diese als besonders trockene Messstellen auf. Die Wasserspeicherkapazität der Messstelle 3_5 ist mit 42 mm die höchste aller untersuchten Profile. Die Messstelle 5_5 hat ebenfalls keine tiefe Wasserspeicherkapazität (Tabelle 3.4). Die Exposition, die Steigung und die Höhenlage sind bei den beiden Messstellen 3_5 und 5_5 ähnlich wie bei den andern. Beide Messstellen befinden sich am unteren Lückenrand in Muldenlage. Die Messstellen 3_5 und 5_5 haben die durchschnittlich kürzeste Sonnenscheindauer pro Tag und die tiefsten Direktstrahlungswerte von allen Messstellen im Lärchenwald (Tabelle 8.9 Anhang). Die Durchschnittstemperatur der Messstelle 5_5 ist die tiefste durchschnittliche Temperatur im Lärchenwald und auch der Durchschnitt der 10 % höchsten Temperaturen ist der geringste aller Profile im Lärchenwald. Die Durchschnittstemperatur bei der Messstelle 3_5 ist ebenfalls tief, sie liegt nur wenig über jener der Messstelle 5_5. Jedoch ist der Durchschnitt der 10 % höchsten Temperaturen der zweithöchste Wert im Lärchenwald (Tabelle 3.3). Auffallend ist der Bedeckungsgrad der krautigen Bodenvegetation bei den beiden Messstellen 3_5 und 5_5, dieser ist deutlich höher als bei den anderen Messstellen (Tabelle 8.11 Anhang).

Im Gegensatz dazu fällt die Saugspannung im Lärchenwald in der Lücke 1 am oberen und in der Lücke 4 am unteren Rand sowie im Fichtenwald während der Messperiode nie unter den Welkepunkt, welcher bei -1.5 MPa liegt. Die Wasserspeicherkapazität bei diesen Messstellen ist nicht höher als bei den anderen. Die Lage der Messstellen 1_1 und 4_5 ist von der Steigung, der Exposition und der Höhe über Meer ähnlich wie bei allen anderen Messstellen. Die Lücke 4 ist die kleinste Lücke und die Lücke 1 ist die grösste. Die Messstelle 1_1 befindet sich am oberen Lückenrand und die Messstelle 4_5 am unteren, wobei beide in Kuppenlage liegen. Die direkte Strahlung und die Sonnenscheindauer der Messstellen 1_1 und 4_5 sind nicht tiefer als im restlichen Lärchenwald, genauso wenig wie die durchschnittliche Temperatur oder der Durchschnitt der 10 % der höchsten Temperaturen. Einzig der Bedeckungsgrad der Bodenvegetation ist bei den Messstellen 1_1 und 4_5 geringer als bei 2_1, 3_5 und 5_5. Die Biomasse bei der Messstelle 1_1 ist hoch, höher als bei den Messstellen 2_1 und 3_5. Jedoch ist die Biomasse bei der Messstelle 4_5 verschwindend gering.

Das Bodenwassermodell zeigte, dass die Messstellen mit tiefen Wasserspeicherkapazitäten mehr Trockentage haben. Es ergeben sich im Lärchenwald Trockenheitsindices zwischen 0 und 0.20 sowie 0 bis 106 Trockentage pro Jahr (mit Klimadaten von 2011 bis 2014). Im Fichtenwald beträgt der Trockenheitsindex am unteren Rand 0.14 und am oberen Rand 0.47. Am unteren Rand ist es während 91 Tagen trocken, am oberen Rand sogar während 183 Tagen pro Jahr (Tabelle 8.10 und Abbildung 8.65 im Anhang). Laut dem Modell wird im Lärchenwald die trockene Waldgrenze nicht erreicht. Im Fichtenwald am oberen Rand, in Kuppenlage wo der Boden nur 35 cm tief ist und die Wasserspeicherkapazität nur 18 mm beträgt, wird sie hingegen erreicht.

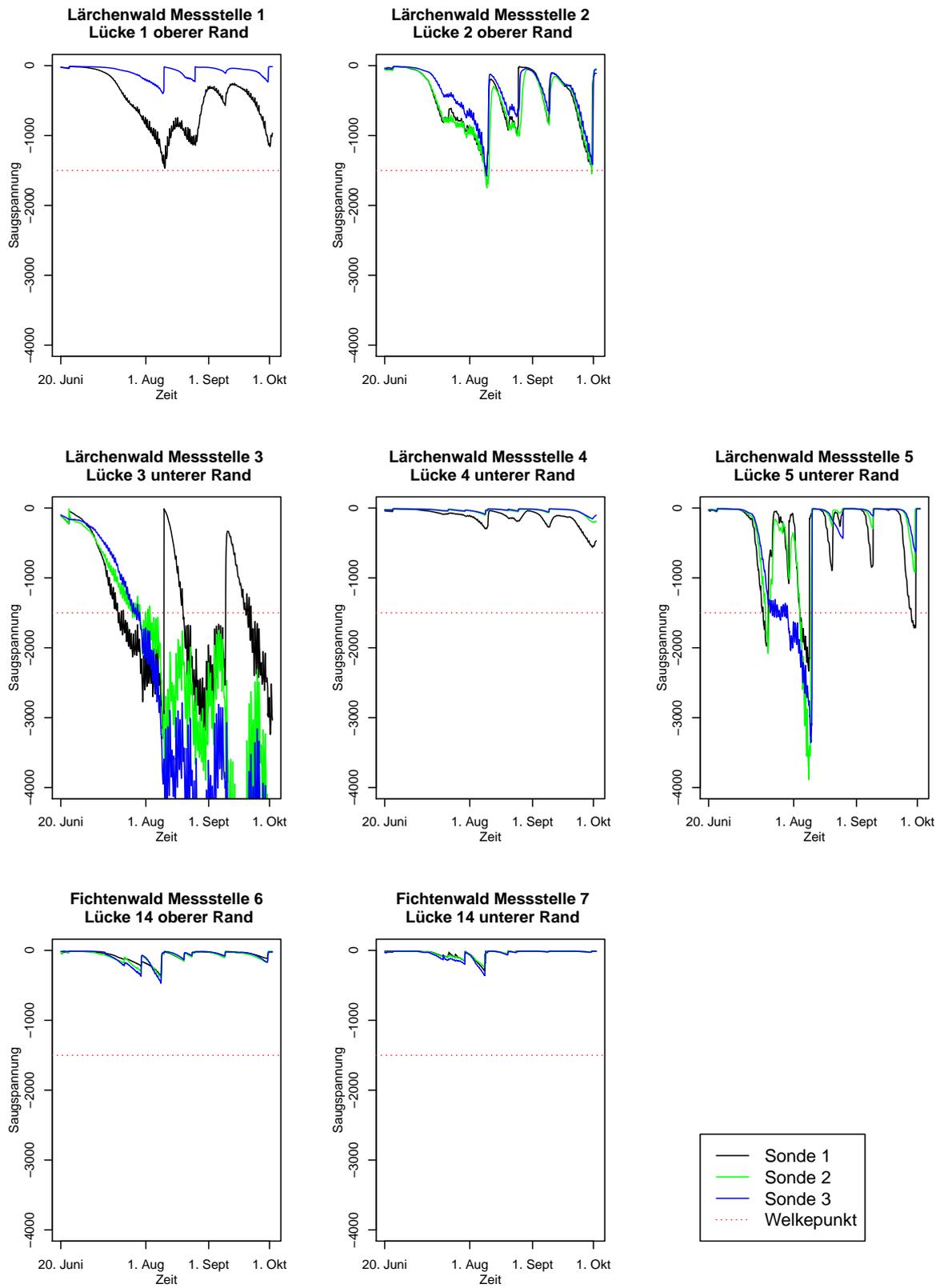


Abbildung 3.10: Saugspannung in den sieben Messstellen, in 10 cm Tiefe, von Juni bis Oktober. Die verschiedenen Farben zeigen die Messungen der verschiedenen Sonden bei der gleichen Messstelle.

3.5 Effekt verschiedener Faktoren auf die Verjüngung

Die Modellierungen des Effekts der verschiedenen Faktoren auf die Verjüngung mit dem Linear-mixed-effect-Modell ergaben, dass kein Faktor einen signifikanten Effekt hat. Weder das volle Modell, welches mit allen Verjüngungsfaktoren als fixe Effekte rechnet noch die andern Modelle, welche mit weniger fixen Faktoren rechnet, konnten einen signifikanten Effekt auf die Verjüngung nachweisen.

4 Diskussion

4.1 Allgemeine Beobachtungen

Der Lärchenwald oberhalb von Valchava in Südexposition ist ein lichter Bestand. Er wirkt viel heller und wärmer als der Vergleichsbestand – der Fichtenwald an der südexponierten Flanke des Val Vau. Der Boden in den Lücken des Lärchenwaldes ist grösstenteils von einer Grasvegetation bedeckt, während unter den Bäumen kaum Bodenvegetation dafür eine dicke, lockere Streuschicht zu finden ist. Sowohl im Lärchen- als auch im Fichtenwald ist die räumliche Variabilität sehr hoch, die Umweltbedingungen ändern auf kurzer Entfernung. Die Lichtbedingungen aber auch die Temperatur und die Bodenfeuchtigkeit variieren innert kurzer Distanz, selbst innerhalb einer Lücke und innerhalb einer Messstelle. Im Fichtenwald in der Lücke 14 konnten diese kleinräumlichen Unterschiede gut beobachtet werden. Die untere Hälfte der Lücke ist von Bodenvegetation bedeckt und es wurde Verjüngung gefunden. Die obere Hälfte der Lücke ist hingegen frei von Vegetation. Kleinräumliche Unterschiede konnten schon in anderen Studien beobachtet werden (Dai 1996; Tranquillini 1964). Fowler (1988) beobachtete zudem, dass verjüngungsgünstige Mikrostandorte auch zeitlich ändern. So beeinflusst das Wetter wie gut ein Substrat für die Verjüngung ist, bei viel Regen kann Streu ein verjüngungsfreundliches Substrat sein (Hanssen 2002). Der Verjüngungserfolg hängt ab von der Wahrscheinlichkeit, dass ein lebensfähiger Samen auf einen verjüngungsgünstigen Mikrostandort fällt (Noble und Alexander 1977). Wenn die räumliche Variabilität hoch ist und gute Mikrostandorte selten sind, ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Samen auf einen guten Mikrostandort fällt gering, wodurch die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Verjüngung ebenfalls klein ist.

4.2 Licht

Das Lichtregime in einer Lücke variiert je nach Winkel der Sonne, welche unter anderem von der Höhe der Bäume welche die Lücke umgeben, aber auch von der Grösse, der Form und der Ausrichtung der Kronenöffnung, sowie der Position in der Lücke abhängt (Drever und Letzman 2003; Leibundgut 1984; Loeffers et al. 1999). Die Form und die Grösse, sowie die Ausrichtung der Kronenöffnung unterscheiden sich in den beiden untersuchten Wäldern von Lücke zu Lücke stark. Auch innerhalb einer Lücke variiert die Exposition und der Grad der Überschildung, was auf den hemisphärischen Fotos gut zu erkennen ist (Fotos 8.27-8.38 im Anhang). Brang (1996) stellte fest, dass in der südlichen Hälfte seiner Bestandeslücken (hier die untere Hälfte) kaum direktes Licht den Boden erreicht, sondern nur diffuses Licht. Von der Mitte der Lücke zum nördlichen Ende hin nehmen die diffuse und die direkte Strahlung zu. Das nördliche Ende der Lücke erhält diffuse und direkte Strahlung. Dies steht im Widerspruch zu den Resultaten dieser Untersuchung. Es wurde festgestellt, dass die Strahlung auf den Plots 2 bis 4 höher ist als auf den obersten Plots und nicht wie von Brang (1996) beschrieben, gegen den oberen Rand hin stetig zunimmt. Es ist möglich, dass von Süden oder von senkrecht oberhalb eine Abschirmung stattfindet, was zu dem beobachteten Phänomen führt. Dies erklärt möglicherweise auch, weshalb auf gewissen Plots vom Frühling zum Hochsommer eine Abnahme oder eine Stagnation der Sonnenscheindauer und der direkten Strahlung beobachtet werden konnte (Abbildung 3.7 und 3.8). Auf dem Plot 6_1 im Lärchenwald ist dies besonders deutlich zu erkennen. Der Plot 1_6 wird stark überschildert. Im Sommer, wenn die Sonne am senkrechtsten scheint, erreicht weniger Strahlung den

Boden. Zudem nimmt die Strahlung an Südhängen die steiler als 20° sind bei zunehmender Hangneigung im Sommer ab, der Einfallswinkel der Strahlung wird flacher. Im Winter, Frühling und Herbst ist die Strahlung an steilen Hängen jedoch höher als auf flachem Grund. (Mitscherlich 1981; Schleppei und Paquette im Druck). Somit könnte auch die starke Neigung im Lärchenwald der Grund für die unerwartete Abnahme der Strahlung im Sommer sein. Bei der Interpretation der Strahlungsdaten muss beachtet werden, dass die Strahlungswerte anhand der hemisphärischen Fotos modelliert wurden, es sind keine tatsächlich gemessenen Werte.

Bei der Berechnung der Sonnenscheindauer gewichtet die Software Hemisfer 2beta die direkte Strahlung am Abend gleich wie die direkte Strahlung über den Mittag und es wird ebenfalls nicht berücksichtigt, dass die Strahlung im Sommer energiereicher ist als im Winter (Mitscherlich 1981). Somit sagt die Sonnenscheindauer nichts über die Intensität der Strahlung aus, es wird nicht berücksichtigt wie steil die Sonne einfällt. Bei der Modellierung der direkten Strahlung wird die Strahlungsintensität hingegen berücksichtigt. Dies erklärt auch den unterschiedlichen Verlauf der Sonnenscheindauer und der direkten Strahlung über das Jahr. Für die weitere Diskussion wird die direkte Strahlung betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass diese für die Verjüngung relevanter ist als die indirekte Strahlung (Brang 1998).

4.3 Temperatur und Bodenwasserhaushalt

An sieben Messstellen (zwei im Fichten- und fünf im Lärchenwald) wurden mit MPS2-Sonden und Temperatursensoren die Saugspannung im Boden, respektive die Temperatur an der Bodenoberfläche gemessen. Die Temperatur am Boden wird stark von der Strahlung der Sonne beeinflusst. Durch direkte Strahlung kann der Boden stark erwärmt werden (Tranquillini 1964). Die grosse Variabilität bei den Strahlungsverhältnissen führt dazu, dass die Temperatur, eine räumliche Variabilität aufweist (Abbildung 3.9). Die Unterschiede zwischen den Messungen der verschiedenen Sensoren hängen aber auch davon ab, wie die Sensoren ausgelegt wurden, wie stark sie von der Bodenvegetation verdeckt waren oder ob sie direkt bestrahlt wurden. Es sind Unterschiede in kurzer Zeit zu sehen, jedoch schwankt die Temperatur kurzzeitig nur innerhalb von 20°C . In der Literatur wird beschrieben, dass die Bodentemperatur im Gebirge pro Tag um mehr als 50°C schwanken kann (Mitscherlich 1981; Pallmann und Frei 1943). Dass nur Schwankungen von 20°C gemessen wurden, spricht gegen eine direkte Bestrahlung.

Die räumliche Variabilität der Strahlung und der Temperatur aber auch die Wasserspeicherkapazität des Bodens und die Interzeption welche innert kürzester Distanz ändern, beeinflussen die Feuchtigkeit im Boden. Der Verlauf der Saugspannung variiert von Messstelle zu Messstelle, aber auch innerhalb einer Messstelle stark (Abbildung 3.10). Die Bodenfeuchtigkeit ist in 80 cm Tiefe ausgeglichener und schwankt weniger als in 10 cm Tiefe (Abbildung 8.64 im Anhang). Die Wasserleitfähigkeit im Boden ist dank hoher Porosität und geringem Tonanteil hoch. Dies und die Beobachtung des unterschiedlichen Verlaufs der Saugspannung in 10 cm respektive in 80 cm Bodentiefe lassen vermuten, dass das Wasser nicht durch einen lateralen Fluss eingetragen wird. Es wird durch Niederschlag von oben her eingetragen und während der niederschlagfreien Zeit verdunstet oder von Krautpflanzen, welche kurze Wurzeln haben, verbraucht. In 80 cm Tiefe ist der Boden feuchter als in 10 cm Tiefe. Die Feuchtigkeit nimmt nach oben hin ab. Es ist möglich, dass der Boden weiter oben an der Oberfläche wo die Samen liegen noch trockener ist, wodurch die Bedingungen für die Keimung und die Etablierung der Keimlinge zu trocken sind und dadurch eine erfolgreiche Verjüngung verhindert wird. Trockenheit führt zu osmotischem Stress in der Pflanze, welcher die Mortalität erhöht (Riglin et al. 2006) und die Keimfähigkeit der Samen reduziert oder ganz herabsetzt (Barnett 1969; Bonner und Farmer 1966; Fechner et al. 1981). Samen nehmen Wasser auf, bevor sie keimen und vitalere Samen brauchen weniger Wasser zur Keimung. Zu starke Austrocknung schädigt Samen, was dazu führt, dass es

weniger gute Bedingungen gibt, bei denen diese keimen können (Barnett 1969; Hegarty 1978).

In der folgenden Diskussion wird nur auf die Saugspannung in 10 cm Tiefe eingegangen, denn für die Ansamung ist vor allem die Bodenfeuchtigkeit in den obersten Zentimetern des Bodens entscheidend.

Laut dem Linear-mixed-effect-Modell hat keiner der Eingangsgrößen einen Effekt auf die Verjüngung. Jedoch muss dabei beachtet werden, dass das Modell mit einer binären Zielvariable rechnet. Es wurde angenommen, dass im Lärchenwald keine und im Fichtenwald auf jedem Plot Verjüngung vorkommt. Daten für einen Gradienten der Verjüngung, wie die Anzahl Verjüngung pro Plot würden die Genauigkeit und die Aussagekraft des Modells erhöhen.

4.4 Der Lärchenwald und der Fichtenwald im Vergleich

Es fällt mehr Strahlung in den Lärchenwald (Abbildung 3.6), obwohl der Lärchenwald an einer steilen Lage wächst. Auch der Gap Light Index (GLI) ist im Lärchenwald signifikant höher, was bedeutet, dass bei gleicher potentieller Strahlung ausserhalb des Bestandes, effektiv mehr Strahlung in die Lücke fällt. Somit wird die Hypothese 3 bestätigt. Die Strahlungsintensität ist höher aufgrund der grösseren Lücken im Lärchenwald und den lichtereren Kronen der Lärchen – was auf den hemisphärischen Fotos gut zu erkennen ist (Abbildung 8.27-8.38 im Anhang). Die Wirkung der direkten Strahlung ist je nach Tages- und Jahreszeit unterschiedlich, zu viel Strahlung kann sich negativ auf die Verjüngung auswirken (Frehner 2001; Larcher 2003; Noble und Alexander 1977). Am Südhang wirkt sich die direkte Strahlung über den Mittag immer negativ auf die Verjüngung aus, die Sonne erwärmt bei intensiver Bestrahlung den Boden so stark, dass die Wasserversorgung gefährdet ist (Brang 1996; Brang 1998).

Die durchschnittlich höhere Temperatur im Lärchenwald ist zum Teil durch die höhere Strahlung zu erklären, denn bei den fünf Messstellen im Lärchenwald wurden durchschnittlich höhere Strahlungswerte gemessen als bei den zwei Messstellen im Fichtenwald. Der Fichtenwald liegt zudem 200 m höher als der Lärchenwald und die Temperatur nimmt im Durchschnitt 0.5°C pro 100 m ab (Landolt 1992). Sowohl im Lärchen- als auch im Fichtenwald traten hohe Temperaturen auf (Abbildung 3.9), weshalb die Hypothese 5 nicht bestätigt werden kann. Im Fichtenwald wurden die hohen Temperaturen jedoch an einer extrem exponierten Stelle gemessen, während sie im Lärchenwald bei der Messstelle 3_5, am unteren Lückenrand in Muldenlage gemessen wurden. Daraus lässt sich schliessen, dass auch am Fichtenwald ungünstige Bedingungen vorkommen, jedoch nur an exponierten Stellen, während sie im Lärchenwald verbreitet auftreten. Die optimale Temperatur für die Keimung liegt für die Fichte zwischen 15°C und 25°C (Brang 1998). Hohe Temperaturen können Pflanzen schädigen, besonders in kritischen Lebensphasen wie der Keimung (Larcher 2003; Laude und Chaugule 1953). Konstante Temperaturen von mehr als 25°C senken den Keimungserfolg (Brang 1996) und Temperaturen von über 40°C können für Pflanzen gefährlich werden (Mitscherlich 1981). Dies bestätigt auch Sapper (1935), der beobachtete, dass Pflanzen nach zehn Minuten bei über 51°C geschädigt werden. Speziell auf dunklem, vegetationsfreiem Boden ist die Gefahr von hohen Temperaturen und Hitzeschäden gross (Körner 2003).

Laut dem Bodenwasser-Modell wird im Lärchenwald die trockene Waldgrenze nicht erreicht, im Fichtenwald wird sie am oberen Rand bei der Messstelle 14_1 erreicht (Tabelle 8.10 im Anhang). Das Bodenwasser-Modell berechnet die Evapotranspiration über die Globalstrahlungswerte, welche bei der Klimastation in Sta. Maria gemessen wurden. Es berücksichtigt jedoch die unterschiedliche Strahlungsverteilung in den Lücken nicht. Auch berücksichtigt es nur die Wasserspeicherkapazität und die Höhe über Meer aber keine weiteren Standortparameter, wie die Exposition oder die Steigung des Hangs. Dies schränkt die Genauigkeit des Modells massiv ein, weshalb die simulierten Trockenheitsindices mit Vorsicht betrachtet und interpretiert werden müssen. Die Messstelle 14_1 liegt in Kuppenlage, zudem ist der Boden an dieser Stelle flachgründig. Am

unteren Rand ist der Trockenheitsindex deutlich tiefer, die trockene Waldgrenze wird nicht erreicht. Dies verdeutlicht erneut die Wichtigkeit des Mikrostandorts und die grosse räumliche Variabilität der Umweltbedingungen.

Im Lärchenwald ist es trockener als im Fichtenwald, die Hypothese 1 wird bestätigt. Im Lärchenwald fiel die Saugspannung in 10 cm bei mehreren Messstellen unter den Welkepunkt und es wird angenommen, dass es an der Bodenoberfläche noch trockener ist. Für die Verjüngung ist jedoch gerade die Feuchtigkeit an der Bodenoberfläche entscheidend. Die Wasserspeicherkapazität des Bodens im Lärchenwald ist durchschnittlich grösser als jene im Fichtenwald (Tabelle 3.4), die trockeneren Verhältnisse im Lärchenwald können nicht durch die Bodeneigenschaften erklärt werden. Auch der Niederschlagsverlust durch die Interzeption kann nicht der Grund für die trockeneren Bedingungen im Lärchenwald sein. Tannenarten speichern mehr Niederschlag in ihren Kronen als Kiefernarten (Mitscherlich 1981). Die Fichte entspricht der Tanne und die Lärche ist mit der Kiefer vergleichbar. Eine mögliche Erklärung ist in der durchschnittlich tieferen Temperatur im Fichtenwald zu suchen. Allerdings wurden im Fichtenwald bei den Messstellen am oberen Rand auch hohe Temperaturen gemessen. Die Temperatur spielt vermutlich eine Rolle, dies kann aber nicht eindeutig belegt werden. Ein weiterer Faktor ist die Transpiration der beiden Baumarten. Die Lärche hat eine höhere Transpiration als die Fichte (Mitscherlich 1981), wodurch dem Boden im Lärchenwald mehr Wasser entzogen wird.

Die spezifische Reaktion auf Trockenheit ist von Art zu Art verschieden. Die Fichte ist eine der am trockenheitsempfindlichsten Baumarten Mitteleuropas. Sie schliesst ihre Stomatas im Sommer und reagiert mit Zuwachseinbussen (Ellenberger und Leuschner 1996; Zweifel et al. 2009). Dass die Fichte sensibler auf Trockenheit reagiert als die Lärche, könnte die Ursache für ihr Fehlen in diesem Wald sein.

Die Streuauflage ist im Lärchenwald mächtiger als im Fichtenwald (Abbildung 3.5), die Hypothese 7 wird bestätigt. Die Fichte verliert verglichen mit der Lärche pro Jahr die doppelte Masse an Nadeln (in t/ha) (Mitscherlich 1975), es muss jedoch relativiert werden, dass die Lärchennadeln leichter als Fichtennadeln sind (Mitscherlich 1970). Somit verliert die Fichte Volumenmässig nicht mehr Streu als die Lärche. Im Lärchenwald herrschen trockenere Bedingungen als im Fichtenwald, was einen negativen Einfluss auf den Streuabbau im Lärchenwald hat. Jedoch ist es im Lärchenwald wärmer, was sich wiederum positiv auf den Abbau auswirkt (Duboc et al. 2012; Djukic et al. 2012). Der Kalziumgehalt in Fichtennadeln ist um einiges höher und das C:N Verhältnis ist tiefer als in Lärchennadeln (Mitscherlich 1975; Waltert et al. 2004). Ein hoher Kalziumgehalt und ein tiefes C:N Verhältnis fördern den Streuabbau (Blume et al. 2010; Leitgeb et al. 2012). Somit überwiegt hier vor allem der Einfluss der Streuqualität und der Trockenheit auf den Abbau der Streu, was nicht durch den Einfluss der höheren Temperatur im Lärchenwald kompensiert werden kann. Dies führt zu dem beobachteten Phänomen, dass die Streuauflage im Lärchenwald dicker ist als im Fichtenwald. Das Keimbeet spielt eine wichtige Rolle für den Erfolg der Verjüngung, besonders für Arten mit kleinen Samen wie die Lärche und die Fichte (Baier et al. 2006; Baier et al. 2007). Die Lärche keimt am besten auf Rohböden. Auf Humus vertrocknen die schwachen Keimpflanzen und gegen die Bodenvegetation kommen sie nicht an (Ellenberger und Leuschner 201). Auch die Fichte keimt bevorzugt auf Rohböden (Brang 1998; Frehner 2001; Koch und Walentowski 2012; LePage et al. 2000). Ihre Keimlinge sind jedoch weniger empfindlich als die Keimlinge der Lärche (Ellenberger und Leuschner 2010). Der Verjüngungserfolg nimmt mit der Mächtigkeit der Streuauflage ab. Speziell in kontinentalen Klimaregionen am Südhang, wirkt sich die Streuauflage negativ auf das Überleben der Verjüngung aus (Gray und Spies 1997; Hanssen 2002), denn Streu kann bei hoher Strahlung sehr heiss werden, was die Verdunstung verstärkt und die Kombination von Trockenheit und Hitze führt zum Absterben der Keimlinge (Brang 1996).

Im Lärchenwald hat es trotz der trockeneren Verhältnisse und der grösseren Streuauflage mehr Bodenvegetation als im Fichtenwald (Abbildung 3.3), somit wird auch die Hypothese 6 bestätigt. Die Bodenvegetation

profitiert von der höheren Strahlung und der höheren Temperatur (Landolt 1992). Die Wirkung der Bodenvegetation auf die Verjüngung ist abhängig von der Dichte und der Art der Vegetation. Bei dichter Grasvegetation gibt es keine Verjüngung (Baier et al. 2007; Diaci et al. 2005;), denn die Vegetation konkurriert mit der Verjüngung an trockenen nährstoffarmen Standorten wie hier im Lärchenwald um Wasser und Nährstoffe (Duryea und Brown 1984; Hornschuch et al. 2008; Leibundgut 1986).

Es können keine Angaben zum Unterschied in der Durchwurzelungsintensität der verschiedenen Plots gemacht werden. Die Abschätzung der Durchwurzelungsintensität und die Einteilung in vier Kategorien waren zu grob und ungenau. Die Einteilung müsste genauer und in mehr als vier Kategorien geschehen. Besser als die Einteilung in Kategorien wäre eine Messung, wobei man kontinuierliche Werte erhält.

Standortfaktoren wie die Höhe über Meer, die Steilheit und die Exposition sind ebenfalls entscheidend für eine erfolgreiche Verjüngung. Hester (2008) fand heraus, dass die meiste Verjüngung in weniger steilem Gelände zu finden ist. Ab einer Steigung von 40°, welche im Lärchenwald überschritten wird, ist nur wenig Verjüngung zu finden. Die Verjüngung wird durch Schneebewegungen beschädigt, weshalb an steilen Hängen die Verjüngung vor allem hinter einem Hindernis oder auf einem erhöhten Mikrostandort zu finden ist (Baier et al. 2007), was im Lärchenwald mit den Feldbeobachtungen übereinstimmt.

4.5 Der obere und der untere Rand der Lücken im Vergleich

Im Lärchenwald ist der oberste Plot nie der am stärksten besonnte Plot innerhalb einer Lücke, zum Teil ist die direkte Strahlung sogar tiefer als auf dem Plot 5 (Abbildung 3.7). Dies liegt wohl daran, dass die obersten Plots im Lärchenwald alle leicht überschirmt sind. Somit muss die Hypothese 4 verworfen werden, die Strahlung ist am oberen Rand nicht immer höher als am unteren Rand - nur zum Teil. Beim direkten Vergleich des oberen und des unteren Rands wurden bei den beiden Messstellen 14_1 und 2_1 am oberen Rand jedoch jeweils höhere Strahlungswerte gemessen als bei den Messstellen 14_5 und 4_5 am unteren Rand. Auch die durchschnittliche Temperatur war höher und die Saugspannung negativer (Tabelle 3.3 und Abbildung 3.10). Die Hypothese 2, dass der obere Rand trockener ist als der untere, wird somit basierend auf den Vergleichen 2_1 mit 4_5 und 14_1 mit 14_5 bestätigt. Bei der Messstelle 14_1 fehlt die Bodenvegetation, welche den Boden beschattet. Die leicht höhere Strahlung trifft direkt auf den unbedeckten Boden, was zu einer höheren Temperatur und einer höheren Verdunstung führt. Ausserdem speichert der Boden mit seiner tiefen Wasserspeicherkapazität das Wasser kaum, es fliesst schnell ab, was durch die Kuppenlage verstärkt wird. Die Messstelle 2_1 liegt leicht unter Schirm und ist von Interzeption betroffen. Zudem fällt der Unterschied in der Bodenvegetation der Messstellen 2_1 und 4_5 auf. Der Bedeckungsgrad ist bei 2_1 ungefähr doppelt so hoch wie bei 4_5, die Biomasse beträgt fast das Siebenfache (Tabelle 8.11 im Anhang).

Dass die Bodenvegetation eine Rolle für die Bodenfeuchtigkeit spielt, zeigt sich auch bei den Messstellen 3_5 und 5_5 – den Messstellen mit der grössten Trockenheit. Die Wasserspeicherkapazität ist nicht geringer als bei den andern Messstellen, diese kann die trockenen Verhältnisse nicht erklären, genauso wenig können es die Lage, die Interzeption oder die Strahlung und die Temperatur. Jedoch wächst bei den beiden Messstellen deutlich mehr Bodenvegetation als bei den anderen Messstellen.

Das Gegenbeispiel sind die feuchten Messstellen 1_1 und 4_5, die Saugspannung sinkt nie unter den Welkepunkt. Auch dies kann weder durch die Wasserspeicherkapazität des Bodens noch durch die Lage erklärt werden und auch nicht durch die Temperatur oder die Strahlung. Jedoch wächst bei beiden Messstellen wenig Bodenvegetation, was darauf hindeutet, dass die Bodenvegetation eine entscheidende Rolle bei der Feuchtigkeit des Oberbodens spielt. Müller (2011) beobachtete ebenfalls, dass die Bodenvegetation einen grossen Einfluss auf den Bodenwassergehalt hat. Je nach Artenzusammensetzung beträgt die Evapotran-

spiration der Bodenvegetation 20 % bis 30 % der jährlichen Niederschlagsmenge. Reine Grasdecken haben die grösste Evapotranspiration, sie beeinflussen den Wasserhaushalt eines Bestandes stark, was auch Duryea und Brown (1984) feststellt. Hingegen kann eine leichte Bedeckung des Bodens durch Bodenvegetation als Verdunstungsschutz wirken, indem sie den Boden beschattet und die Austrocknung mindert (Mitscherlich 1981; Valkonen und Maguire 2005). Somit ist eine leichte Bodenvegetation für die Verjüngung positiv, eine dichte Bodenvegetation ist jedoch negativ.

In beiden Wäldern haben die obersten Plots im Durchschnitt deutlich am meisten Streu (Abbildung 3.5). Dies liegt daran, dass die Plots 1 unmittelbar unterhalb der Krone liegen. Auf den Plots 2 bis 5 wurde jeweils ähnlich viel Streu gefunden. Die Lärchenstreu ist leicht (Mitscherlich 1970) und wird durch Wind verfrachtet. Dies führt dazu, dass sie – wie beobachtet – über den ganzen Hang verteilt wird, weshalb die Streuauflage im Lärchenwald in der gesamten Lücke durchschnittlich höher ist als in einer Lücke im Fichtenwald.

Auf den obersten Plots wurde am wenigsten Bodenvegetation gefunden, dies aufgrund der trockenen Bedingungen. Die mächtige Streuauflage, die Interzeption und der Wasserentzug im Wurzelbereich machen das Wachstum für die Bodenvegetation – und auch für die Verjüngung – unter Schirm beinahe unmöglich (Brang 1996; Brang 1998; Frehner 2001; Hornschuch et al. 2008).

4.6 Widersprüche

Bei der Auswertung der Daten dieser Arbeit traten Widersprüche zur Ökologie und zu den Beobachtungen im Feld auf, welche im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

Im Lärchenwald in der Lücke 4 ist die Bodenvegetation nur spärlich vorhanden, sie ist niedrig und weist einen geringen Bedeckungsgrad auf (Abbildung 8.21 im Anhang). Dies lässt trockene Bedingungen vermuten, jedoch wurden bei der Messstelle 4_5, am unteren Rand der Lücke 4, die feuchtesten Bedingungen im Lärchenwald gemessen (Abbildung 3.10). Hingegen ist in der Lücke 3 eine üppige Grasvegetation zu finden, was auf feuchte Verhältnisse im Boden hindeutet, allerdings fällt die Saugspannung am unteren Rand der Lücke 3 längere Zeit unter den Welkepunkt (Abbildung 8.20 im Anhang).

Es wurde davon ausgegangen, dass im Lärchenwald die Feuchtigkeit der limitierende Faktor ist. Es ist aber möglich, dass das beobachtete Phänomen nicht primär durch die Feuchtigkeit im Boden beeinflusst wird, sondern ein weiterer Faktor einen grossen Effekt hat, welcher nicht in dieser Arbeit untersucht wurde. Möglicherweise ist der Untergrund entscheidend. Auf die Wichtigkeit des Untergrundes verweist auch Gholz (1982). Bei der Messstelle 4_5 wurden in den obersten 20 cm des Bodens die tiefste Basensättigung und der geringste organische Kohlenstoffgehalt von allen Messstellen gefunden. Im obersten Horizont sind diese Werte besonders tief (Tabellen 8.2 und 8.4 im Anhang). Möglicherweise ist die Nährstoffversorgung in der Lücke 4 schlecht. Die Kationenaustauschkapazität ist in den obersten 20 cm des Bodens im Fichtenwald deutlich höher als im Lärchenwald und eine tiefe Kationenaustauschkapazität spricht für eine geringe Nährstoffverfügbarkeit (Mitscherlich 1975). Allerdings ist die Kationenaustauschkapazität in den beiden Lücken 3 und 4 nicht stark unterschiedlich. Die Verfügbarkeit der Nährstoffe wurde in dieser Arbeit jedoch nicht untersucht, weshalb dazu keine Aussage gemacht werden kann. Es sind zwar Daten zu gewissen Nährstoffen vorhanden (Tabellen 8.1 und 8.3 im Anhang), Daten zu wichtigen Nährstoffen wie dem Stickstoff fehlen jedoch.

Eventuell wurden die Feldbeobachtungen falsch interpretiert und die Bodenvegetation beeinflusst den Wasserhaushalt im Boden und nicht wie angenommen umgekehrt. Auch Ellenberger und Leuschner (2010) bemerkt, dass in lichten Wäldern der Bodenwasserhaushalt von der dichten Bodenvegetation beeinflusst wird. Eventuell wurden die Feldbeobachtungen richtig interpretiert und die Lücke 4 ist tatsächlich trockener als die

Lücke 3, dies konnte mit den Messungen jedoch nicht richtig dargestellt werden. Die Messungen sind nur eine Momentaufnahme. Auch wenn die Sonden während einer ganzen Saison aufzeichneten, zeigt es doch nur die Verhältnisse während ein paar Monaten, was nicht den langzeitlichen Verhältnissen entsprechen muss. Der Sommer 2013 war ein ausgesprochen trockener und warmer Sommer (Klimabulletin 2013). Es ist möglich, dass die Lücke 4 tatsächlich in den letzten Jahren trockener war als im Sommer 2013 und sich aus diesem Grund eine andere Bodenvegetation etabliert hat. Oder es ist nicht der Sommer der für die Bodenvegetation ausschlaggebend ist. Um dies zu überprüfen muss eine längere Zeitreihe der Saugspannungsdaten von mehreren Jahren betrachtet werden, welche Daten aller Jahreszeiten enthält. Die Messungen sind nicht nur zeitlich sondern auch räumlich begrenzt. Wie erwähnt ist die räumliche Variabilität hoch und es wurden jeweils pro Lücke nur an einer Stelle Messungen gemacht. Möglicherweise wurde an einer Stelle gemessen, die nicht repräsentativ für die Lücke ist. Oder für die Vegetation sind nicht die Feuchtigkeitsverhältnisse in 10 cm beziehungsweise in 80 cm Tiefe entscheidend.

4.7 Methodenkritik

Zur Untersuchung der unterschiedlichen Positionen innerhalb der Lücken wurde jeweils ein Transsekt mit fünf Plots durch jede Lücke gelegt. Die räumliche Variabilität der Umweltbedingungen ist hoch, ein feinerer Gradient wäre besser gewesen. Denn die Plots lagen zum Teil bis zu 8 m auseinander. Es hätten mehr Plots pro Lücke untersucht werden sollen, da mit einer grösseren Datenmenge eine bessere Aussage zu den Bedingungen in der Lücke hätte gemacht werden können.

Die Kronenöffnung der verschiedenen Lücken variieren stark. Vor allem die Lücken der beiden Wälder sind unterschiedlich, im Fichtenwald sind sie deutlich kleiner. Es wurden jedoch keine grösseren Lücken gefunden. Nicht nur die Grösse der Lücken ist in den beiden Wäldern verschieden, auch liegt der Fichtenwald deutlich höher als der Lärchenwald. Brang (1996) sagt, dass die ökologischen Bedingungen von 1570 müM bis 1800 müM nur unwesentlich ändern. Trotzdem ist die Temperatur 200 m weiter oben tiefer, was einen Einfluss auf weitere Verjüngungsfaktoren hat. Es ist schwierig, geeigneterer Lücken oder einen besseren Kontrollhang zu finden. Wichtig ist deshalb, dass die Unterschiede bei der Interpretation der Daten oder bei weiteren Untersuchungen beachtet werden.

Die Temperatursensoren wurden auf die Bodenoberfläche gelegt und leicht unter die Bodenvegetation geschoben. Dies, damit sie nicht direkter Strahlung ausgesetzt wurden, was die Messungen verfälscht hätte. Jedoch wurden die Sensoren durch die Bodenvegetation isoliert, wodurch ebenfalls eine Verzerrung der Daten zustande kam. Alternativ hätten die Temperatursensoren nicht auf den Boden gelegt sondern knapp über dem Boden befestigt und gegen direkte Strahlung abgeschirmt werden können. Allerdings ist dieser Versuchsaufbau in dem steilen Gelände heikel, die Aufhängung müsste sehr stabil sein und gut im Boden verankert werden.

Die hemisphärischen Fotos wurden zu einer Zeit aufgenommen, als die Lärchen noch ihre Nadeln trugen. Anhand dieser Fotos wurde auch die Strahlung für jene Monate simuliert, in welchen die Lärchen keine Nadeln tragen und somit mehr Licht in den Bestand lassen. Für die Interpretation der Strahlung wurden allerdings vor allem die Sommermonate betrachtet und für die Berechnung des GLI wurden nur die Werte während der schneefreien Zeit genommen, während welcher die Lärchen Nadeln tragen. Somit ist der Fehler der zu hohen Abschirmung im Winter vernachlässigbar.

Die Fotos wurden circa 1 m über dem Boden aufgenommen. Die Kamera war auf einem Stativ befestigt um sie waagrecht und gegen Norden ausrichten zu können. Für die Keimlinge und die Temperatur auf der Bodenoberfläche, sowie die Feuchtigkeit ist jedoch die Strahlung unmittelbar über dem Boden entscheidend.

4.8 Weiterführendes

Durch die beschränkte Zeit waren einige Untersuchungen nicht möglich. Wichtige Faktoren wie der Frost, die Schneebedeckung und -bewegung oder die Intensität des Verbisses wurden nicht untersucht. Der Frost könnte einen grossen Einfluss haben. Möglicherweise ist der Lärchenwald im Winter grösstenteils schneefrei, da der Schnee aufgrund der hohen Strahlung verdunstet und im steilen Gelände verlagert wird. Ohne Schnee fehlt der Schutz vor tiefen Temperaturen und vor Frost. Dies konnte aber nicht gemessen werden, da diese Arbeit nur während einer befristeten Zeit lief und die Feldarbeit im Sommer durchgeführt werden musste. Auch der Verbiss findet vor allem im Winter statt und konnte nicht untersucht werden. Die Südliche Exposition, die vermutlich wenig mächtige und lückige Schneedecke und die üppige Bodenvegetation machen den Lärchenwald zu einem bevorzugten Wintereinstandsgebiet für Wild. Der Wilddruck und die Verbissintensität sind in diesem Gebiet vermutlich hoch, was ein Grund für die fehlende Verjüngung sein könnte.

Es wurde die Saugspannung im Boden gemessen, von wo das Wasser kam, wurde jedoch nicht untersucht. Es wäre spannend zu wissen, wie viel Wasser bei einem Niederschlag in die Lücken des Bestandes fällt. Dazu könnten auf den verschiedenen Plots Regenmesser aufgestellt werden. Damit könnte der Niederschlagsverlust und die Verteilung des Niederschlags in der Lücke, sowie die Reaktion der Saugspannung auf den Niederschlag untersucht werden, um eine Aussage zu treffen wie stark die Feuchtigkeit im Boden durch den Niederschlag beeinflusst wird. Ein solcher Versuchsaufbau ist jedoch sehr aufwändig und bedarf regelmässiger Überwachung.

Für diese Studie wurden die vorkommenden Arten der Bodenvegetation nicht bestimmt. Es könnte jedoch für weitere Untersuchungen interessant sein, die Arten der Bodenvegetation in den verschiedenen Lücken miteinander zu vergleichen. Die Arten unterscheiden sich in ihrem Wasserverbrauch und wirken unterschiedlich stark auf den Wassergehalt im Boden. Zudem haben sie unterschiedliche Nährstoff- oder Lichtansprüche. So könnten durch die vorkommenden Arten und ihre Zeigerwerte weitere Erkenntnisse zum Wald gewonnen werden (Ellenberger und Leuschner 2010).

Die Anzahl und das Aufkommen der Verjüngung hängt stark von der Häufigkeit der Samen ab (Saksa und Valkonen 2011). Es wurde in verschiedenen Studien beobachtet, dass der Genpool der Lärche sehr klein ist (Konnert et al. 2012), was auf Inzucht zurückzuführen ist. Durch Inzucht wird die Fertilität herabgesetzt (Dieckert 1963; Müller-Stark und Felber 2010;). Es ist möglich, dass dies bei den untersuchten Lärchen auch der Fall ist. Eventuell sind die Lärchen bei Valchava nicht vital genug um Samen, insbesondere keimungsfähige Samen, zu produzieren. Zur Überprüfung könnten Samen im Feld eingetragen und der Keimungserfolg überprüft werden. Dies würde aber einer Studie von mehreren Jahren bedürfen. Eine weitere Idee ist, Zapfen im Lärchenwald zu sammeln und die daraus gewonnenen Samen im Gewächshaus bei keimungsfreundlichen Bedingungen auszusäen, um auszuschliessen dass die Samen zu wenig vital für die erfolgreiche Verjüngung sind.

Es wird vermutet, dass zumindest zum Teil nicht die Feuchtigkeit im Boden sondern ein weiterer Faktor entscheidend für die Bodenvegetation und somit auch für die Verjüngung ist. Dies könnte die Nährstoffverfügbarkeit sein, weshalb für weitere Studien die Nährstoffe im Boden untersucht werden sollten.

5 Schlussfolgerung

Die Resultate zeigen, dass die Bedingungen für eine erfolgreiche natürliche Verjüngung und für das Aufkommen der Fichte im untersuchten Lärchenwald bei Valchava nicht gegeben sind.

Der untersuchte Fichtenwald ist deutlich verjüngungsgünstiger als der Lärchenwald. Aufgrund der geringeren Strahlung und der durchschnittlich tieferen Temperaturen ist es feuchter. Zudem hat es weniger Bodenvegetation, welche die Keimlinge konkurriert und die Streuauflage ist weniger mächtig, wodurch das Keimbeet geeigneter ist.

Im Fichtenwald ist der untere Bereich einer Lücke verjüngungsgünstiger als der obere, es wurde vor allem in der unteren Hälfte einer Lücke Verjüngung gefunden, dies aufgrund der trockeneren Verhältnisse in der oberen Hälfte. Am oberen Rand unter Schirm wurde keine Verjüngung gefunden. Dort ist die Mächtigkeit der Streuauflage deutlich am höchsten und es herrschen aufgrund der Interzeption und dem Wasserentzug durch die Mutterbäume die trockensten Bedingungen, was eine erfolgreiche Verjüngung verunmöglicht.

Auch im Lärchenwald wurde vereinzelt Verjüngung gefunden, was zeigt, dass die Bedingungen für die Ansamung und Keimung an gewissen Stellen im Lärchenwald gegeben sind. Die gefundenen Keimlinge wuchsen in der unteren Hälfte einer Lücke auf freigelegter Mineralerde und auf dem Wurzelteller einer umgefallenen Lärche. Dies bekräftigt die Vermutung, dass der untere Bereich einer Lücke verjüngungsgünstiger ist und das Keimbeet eine entscheidende Rolle spielt. Ein Keimling wurde im Bestand neben einer umgefallenen Lärche gefunden, was darauf hindeutet, dass das Licht nicht der limitierende Faktor für die Verjüngung ist und dass es im Bestand hell genug ist für die Verjüngung. Im Lärchenwald wurde allerdings weniger Verjüngung gefunden als im Fichtenwald, was darauf schliessen lässt, dass keimungsfreundliche Mikrostandorte rar sind. Es wurden nur Keimlinge gefunden, kein Aufwuchs der höher als 15 cm ist. Es ist für die Verjüngung nicht möglich sich zu etablieren und aufzuwachsen. Möglicherweise ist es für sie zu trocken oder ein Nährstoff ist limitiert, der das Wachstum verhindert. Es ist aber auch möglich, dass die Verjüngung vom Wild stark verbissen wird und dadurch abstirbt.

Der Lärchenwald wurde beweidet, der Verbissdruck durch das Vieh war zu hoch für eine erfolgreiche Verjüngung. Die Beweidung förderte zudem den dichten Rasen. Der Rasen profitiert außerdem vom vielen Licht, das dank dem lückigen Bestand und den lichten Kronen der Lärche auf den Waldboden fällt. Vermutlich wurde der Einfluss der Bodenvegetation auf den Bodenwasserhaushalt unterschätzt. Es müssten Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden. Wenn die Saugspannungsmessungen der nächsten Jahre das gleiche Bild zeigen, dann ist dies ein starker Hinweis dafür, dass die Bodenvegetation den Bodenwasserhaushalt entscheidend bestimmt.

Die grossen Lärchen, die vermutlich aus früheren Aufforstungen stammen, haben tiefe Wurzeln und sind nicht von der Konkurrenz mit der Grasvegetation betroffen. Die Lärchen müssen eine gewisse Grösse und eine gewisse Wurzellänge erreichen, um überleben zu können. Vermutlich haben jene Setzlinge überlebt, die auf günstigen Mikrostandorten gepflanzt worden waren.

Entscheidend für die Verjüngung im Lärchenwald sind verjüngungsgünstige Mikrostandorte. Optimal ist Rohboden welcher frei von Bodenvegetation und ohne Streuauflage ist und sich im untern Bereich der Lücke befindet, wo er nicht zu starker Strahlung ausgesetzt ist.

Der Lärchenwald verjüngt sich auf natürliche Weise nicht genügend, die Verjüngung muss künstlich erfolgen. Bei Pflanzungen muss Wert auf den optimalen Mikrostandort gelegt werden.

Es ist nicht belegt ob vor dem 17. Jahrhundert Fichten an diesem Hang gewachsen sind und sie für den Wiederaufbau der Dörfer geschlagen wurden. Es ist jedoch klar, dass die heutigen Standortbedingungen für die Fichte, welche weniger trockenheitstolerant ist als die Lärche, aufgrund der trockenen Verhältnisse ungünstig sind.

6 Dank

Meinen Betreuern Hans-Ueli Frey und Stephan Zimmermann sowie meinem Referent Harald Bugmann danke ich herzlich für die Betreuung meiner Arbeit. Mein besonderer Dank gilt dabei Stephan, der mir stets mit Ratschlägen zur Seite stand und mich während der ganzen Arbeit unterstützte.

Ich danke Marco Walser für die Unterstützung bei der Feldarbeit, Roger Köchli für die ganze Laborarbeit und Patrick Schleppi für die Hilfe bei der Auswertung der hemisphärischen Fotos.

Ein grosser Dank an Hannelore Cueni aus Sta. Maria für ihre Gastfreundschaft während meiner Zeit im Münstertal. Ich danke Hansjörg Weber dem Regionalförster, Usula Koch und dem Biosfera Reservat Val Müstair für die Unterstützung meiner Arbeit.

Ein spezieller Dank gilt Christoph Bigler, der mir bei meiner statistischen Auswertung half und all meine Fragen zur Statistik beantwortete und Maxime Cailleret danke ich für das Bodenwasser-Modell.

Ika Djukic, Elsa Ferstl und Christine Meyer danke ich für die guten Diskussionen, Ratschlägen und motivierenden Worte während der Auswertung und dem Verfassen des Berichts.

7 Schlusswort

Die gewählten methodischen Ansätze erlaubten es mir, die Thesen zu überprüfen und die Aussagen wissenschaftlich zu erhärten. Ein Modell bildet jedoch nur einen Teil der Realität ab. Erst die Diskussion und die kritische Hinterfragung der Modelle, der Resultate und deren Sensitivität schärften meine Betrachtungsweise und den Blick für die Zusammenhänge.

Der längere Einsatz vor Ort ist für den Bezug zur Natur unerlässlich und erlaubt mir die Resultate richtig zu deuten und zu verstehen.

Erfahren habe ich auch, wie entscheidend der Input für die Aussage der Modellresultate ist. Die sorgfältige Vorbereitung und Messung sind eine Voraussetzung für belastbare Aussagen. Da war ich froh um die Betreuung durch die Assistenten, die mich vor grösseren Fehlern bewahrten.

Schlussendlich haben sich der Aufwand im Feld mit Blasen vom Graben und klammen Fingern vom kalten Regen sowie die Labor und Büroarbeit gelohnt und ich darf eine Arbeit präsentieren, die mir gut gelungen ist.

Literaturverzeichnis

- Aas G. (2012) Die Europäische Lärche–Taxonomie, Verbreitung, Morphologie. *Wissen*, 7.
- Arbeitsgruppe Boden (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung - 5. Auflage. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover.
- Baier R., Ettl R., Hahn C., Göttlein A. (2006) Early development and nutrition of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) seedlings on different seedbeds in the Bavarian limestone Alps—a bioassay. *Annals of forest science*, 63(4): 339-348.
- Baier R., Meyer J., Göttlein A. (2007) Regeneration niches of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) saplings in small canopy gaps in mixed mountain forests of the Bavarian Limestone Alps. *European Journal of Forest Research*, 126(1): 11-22.
- Barnett J. P. (1969) Moisture stress affects germination of longleaf and slash pine seeds. *Forest Science*, 15, 275-276.
- Bates D., Maechler M., Bolker B., Walker S. (2013) lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.0 – 4.
- Blume H.-P., Brümmer G. W., Horn R., Kandeler E., Kögel-Knabner I., Kretschmar R., Stahr K., Wilke B.-M., Thiele-Bruhn S., Welp G. (2010) Lehrbuch der Bodenkunde - 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Bugmann H., Cramer W. (1998) Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients. *Forest Ecology and Management*, 103: 247-263.
- Bugmann H., Solomon A. M. (2000) Explaining Forest Composition and Biomass across multiple biogeographical Regions. *Ecological Application*, 10(1): 95-114.
- Bugmann H. (2013) Vorlesungsunterlagen Waldökologie, 9. Auflage. ETH Zürich.
- Bonner F. T., Farmer R. E. Jr. (1966) Germination of sweetgum in response to temperatur, moisture stress, and length of stratification. *Forest Science*, 12: 40-43.
- Brang P. (1996) Experimentelle Untersuchungen zur Ansamungsökologie der Fichte im zwischenalpinen Gebirgswald. Diss. Bezugsquelle: Schweizerischer Forstverein-Geschäftsstelle-ETH-Zentrum.
- Brang P. (1998) Early seedling establishment of *Picea abies* in small forest gaps in the Swiss Alps. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(4): 626-639.
- Cailleret (2014) mündliche Mitteilung Maxime Cailleret.
- Canham, C. D. (1988). An index for understory light levels in and around canopy gaps. *Ecology*, 69(5): 1634-1638.
- Dai X. (1996) Influence of light conditions in canopy gaps on forest regeneration: a new gap light index and its application in a boreal forest in east-central Sweden. *Forest Ecology and Management*, 84(1): 187-197.
- Diaci J., Pisek R., Boncina A. (2005) Regeneration in experimental gaps of subalpine *Picea abies* forest in

the Slovenian Alps. *European Journal of Forest Research*, 124(1): 29-36.

Dieckert V. H. (1963) Einige Untersuchungen zur Selbststerilität und Inzucht bei Fichte und Lärche. Institut für Forstbotanik der Uni Göttingen.

Djukic I., Zehetner F., Watzinger A., Horacek M., Gerzabek M. H. (2012) In situ carbon turnover dynamics and the role of soil microorganisms therein: a climate warming study in an Alpine ecosystem. *FEMS Microbiology Ecology*, 83: 112-124.

Drever C. R., Letzman K. P. (2003) Effects of a wide gradient of retained tree structure on understory light in coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 33 : 137-146.

Duboc O., Zehetner F., Djukic I., Tatyber M., Berger T. W., Gerzabek M. H. (2012) Decomposition of European beech and Black pine foliar litter along an Alpine elevation gradient: Mass loss and molecular characteristics. *Geoderma*, 189: 522-531.

Duryea M. L., Brown G. N. (1984) Seedling Physiology and Reforestation Success. Nijhoff/ Junk Publishers, Dordrecht.

Ellenberger H., Leuschner C. (2010) Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen – 6. Auflage. Eugen Ulmer, Stuttgart

Falk W., Bachmann-Gigl U., Köllin C. (2012) Die Europäische Lärche im Klimawandel. *Wissen*, 7.

Fechner G. J., Burr K. E., Myers J. F. (1981) Effects of storage, temperature and moisture stress on seed germination and early seedling development of trembling aspen. *Canadian Journal of Forest Research*, 11: 718-722

Fowler N. L. (1988) What is a safe site?: Neighbor, Litter, Germination Date, and Patch Effects. *Ecology*, 69(4) : 947-961.

Frehner M. (2001) Entwicklung von Fichtenverjüngung im Lehrwald Sedrun der ETH Zürich (nördliche Zwischenalpen). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 152(1): 12-24.

Frehner M., Wasser B., Schwitter R. (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemaßnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Frey H.-U., Bichsel M., Preiswerk T. (1998) Waldgesellschaften und Waldstandorte Graubündens, 6. Teil Unterengadin – Müntertal. Hrsg.: Forstinspektorat Graubünden, Chur.

Gee G. W., Bauder J. W., Klute A. (1986). Particle-size analysis. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods, 383-411.

Geoportal (2013) Geologie-Portal, geologische Karte <http://www.geologieportal.ch/>, abgefragt am 29. 11. 2013

Gholz H. L. (1982) Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest. *Ecology*, 63(2) : 469-481.

Giraudoux P. (2013). *pgirmess: Data analysis in ecology*. R package version 1.5.7.

Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S. (1999) A lumped water balance to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116 : 269-283.

Granier A., Reichstein M., Bréda N., Janssens I. A., Falge E., Ciais P., Grünwald T., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Facini O., Grassi G., Heinesch B., Ilvesniemi H., Kerönen P., Knohl A., Köstner B., Lagergren F., Lindroth A., Longdoz B., Loustau D., Mateus J., Montagnani L., Nys C., Moors

-
- E., Papale D., Pfeiffer M., Pilegaard K., Pita G., Pumpanen J., Rambal S., Rebmann C., Rodrigues A., Seufers G., Tenhunen J., Vesala T., Wang Q. (2007) Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year : 2003 *Agricultural and Forest Meteorology*, 143 : 123-145.
- Gray A. N., Spies T. A. (1997) Microsite controls on tree seedling establishment in conifer forest canopy gaps. *Ecology*, 78(8): 2458-2473.
- Hanssen K. H. (2002) Effects of seedbed substrates on regeneration of *Picea abies* from seeds. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(6): 511-521.
- Hegarty, T. W. (1978). The physiology of seed hydration and dehydration, and the relation between water stress and the control of germination: a review. *Plant, Cell & Environment*, 1(2): 101-119.
- Hester C. (2008) Die natürliche Wiederbewaldung der Brandfläche Leuk (Wallis). WSL, Birmensdorf.
- Hornschuch F. Krakau U.-K., Lebzien S., Bolte A. (2008) Auswirkungen von Kiefernwurzel-Kokurrenz auf die Entwicklung der Bodenvegetation – Biomasseerhebung in Kleinlysimetern und Bestand. *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie*, 42: 110-126
- Hunziker U., Brang P. (2005) Microsite patterns of conifer seedling establishment and growth in a mixed stand in the southern Alps. *Forest Ecology and Management*, 210(1): 67-79.
- Klimabulletin (2013) Meteo Schweiz, Klimabulletin Sommer 2013. Zürich.
- Koch K., Walentowski H. (2012) Eine Lärche kommt selten allein-Lärchen-Zirbenwälder der Alpen. *Wissen*, 7.
- Konnert M., Jenner R., Nickl A. (2012) Forstliches Vermehrungsgut und Genetik der Europäischen Lärche. *Wissen*, 7.
- Körner C. (2003) *Alpine Plant Life – Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. 2nd Edition. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Landolt E. (1992). *Unsere Alpenflora – 6., neu bearbeitete Auflage*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Larcher W. (2003) *Physiological plant ecology*, 4th edn. Springer, Berlin.
- Laude H. M., Chaugule B. A. (1953) Effect of stage of seedling development upon heat tolerance in brome-grasses. *Journal of Range Management*, 6(5), 320-324.
- Leibundgut H. (1984) *Die natürliche Waldverjüngung – 2., überarbeitete und erweiterte Auflage*. Haupt, Bern.
- Leibundgut H. (1986) *Unsere Gebirgswälder: Natur – Zustand – Bewirtschaftung*. Haupt, Bern.
- Leisibach O. (2011) *Untersuchung der Bodenentwicklung und Mineralogie am Nordost-Abhang des Piz Turettas (Biosfers Val Müstair)*, Bachelorarbeit ZHAW.
- Leitgeb E., Reiter R., Englisch M., Lüscher P., Schad P., Feger K. H. (2012) *Waldböden – ein Bildatlas der wichtigsten Bodentypen*. Wiley-VCH, Weinheim.
- LePage P. T., Canham C. D., Coates K. D., Bartemucci P. (2000) Seed abundance versus substrate limitation of seedling recruitment in northern temperate forests of British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(3): 415-427.
- Lieffers V. J., Messier C., Stadt K. J., Gendron F., Comeau P. G. (1999) Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 796-811.

MapGeo (2013) Bundesamt für Landestopografie

<http://map.geo.admin.ch/>, abgefragt am 29. 11. 2013.

Meteo Schweiz (2013) Meteo Schweiz Klima St. Maria

http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_schweiz/klimadiagramme.html, abgefragt am 30. 4. 2013.

Meteo Schweiz (2014) Die Messdaten der Klimastation Sta. Maria wurden von Meteo Schweiz zur Verfügung gestellt, abgefragt am 6. 1. 2014.

Mitscherlich G. (1970). Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. 1. Band. Form und Wachstum von Baum und Bestand. Sauerländer, Frankfurt am Main.

Mitscherlich G. (1981). Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. 2. Band. Waldklima und Wasserhaushalt. 2. überarbeitet und erweiterte Auflage. Sauerländer, Frankfurt am Main.

Mitscherlich G. (1975). Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. 3. Band. Boden, Luft und Produktion. Sauerländer, Frankfurt am Main.

Moore M. B., Kidd F. A. (1982) Seed source variation in induced moisture stress germination of ponderosa pine. *Tree Planters' Notes* 33 (1): 12-14.

Müller-Stark G., Felber F. (2010) Genetische Variation in Altbeständen der Lärche und ihrer natürlichen Verjüngung im Alpenraum | Genetic variation in adult stands of European larch and its natural regeneration in the Alpine habitat. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 161 (6 | 2010), 223-230.

Müller J. (2011) Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasserhaushaltes in Wäldern des nordostdeutschen Tieflands. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 12: 37-46.

Negi S. S. (1998) Forest tree seed. International book distribution. Dehra Dun, Indien.

Noble D. L., Alexander R. R. (1977) Environmental Factors Affecting Natural Regeneration Engelmann Spruce in the Central Rocky Mountains. *Forest Science*, 23(4): 420-429.

Ott E., Lüscher F., Frehner M., Brang P. (1991) Verjüngungsökologische Besonderheiten im Gebirgsfichtenwald im Vergleich zur Bergwaldstufe. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 142(11): 879-904.

Pallmann H., Frei E. (1943) Beitrag zur Kenntniss der Lokalklimate einiger kennzeichnender Waldgesellschaften des schweizerischen Nationalparks (Fuorn). HR Sauerländer, Aarau.

Pelissier F. (1993) Effect of phenolic compounds in humus on the natural regeneration of spruce. *Phytochemistry*, 36(4): 865-867.

R Development Core Team (2011) R: A language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Wien.

Reif A., Przybilla M. (1995) Zur Regeneration der Fichte (*Picea abies*) in den Hochlagen des Nationalparks Bayerischer Wald. *Hoppea*, 56: 467-514.

Rich P. M. (1990). Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Reviews*, 5(1): 13-29.

Ridler W., Calvard S. (1978) Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE Trans. Syst. Man Cyber*, 8, 260-263.

Rigling A., Dobbertin M., Bürgi M., Feldmeier-Christe E., Gimmi U., Ginzler C., Graf U., Mayer P., Zweifel

-
- R., Wohlgemuth T. (2006) Baumartenwechsel in den Walliser Waldföhrenwäldern. *Forum für Wissen*: 23-33.
- Saksa T., Valkonen S. (2011) Dynamics of seedling establishment and survival in uneven-aged boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 261(8), 1409-1414.
- Sapper I. (1935) Versuche zur Hitzeresistenz der Pflanzen. *Planta*, 23(4): 518-556.
- Schleppi P., Conedera M., Sedivy I., Thimonier A. (2007) Correcting non-linearity and slope effects in the estimation of the leaf area index of forests from hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144: 236-242.
- Schleppi P., Paquette A. (in Druck) Solar radiation in forests: theory for hemispherical photography. In: Fournier R., Hall R. (ed.). Hemispherical photography in forest science: theory, methods, applications.
- Schütt P., Weisgerber H., Schuck H. J., Lang U. M., Stimm B., Roloff A. (eds.) (2004) Lexikon der Nadelbäume: Verbreitung – Beschreibung – Ökologie - Nutzung. Nikol, Hamburg.
- Senn J., Schönberger W. (2001) Zwanzig Jahre Versuchsaufforstung Stillberg: Überleben und Wachstum einer subalpinen Aufforstung in Abhängigkeit vom Standort. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 125: 226-246.
- Teepe R., Dilling H., Beese F. (2003) Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(1), 111-119.
- Tranquillini W. (1964) The physiology of plants at high altitudes. *Annual Review of Plant Physiology*, 15(1), 345-362.
- Val Müstair (2014) Cumün da Val Müstair
http://www.cdvm.ch/HP/02deutsch/Forstamt/Unser_Wald/unser_Wald_in_Zahlen001.html, abgefragt am 14. 2. 2014.
- Valokonen S., Maguire D. A. (2005) Relationship between seedbed properties and the emergence of spruce germinants in recently cut Norway spruce selection stands in Southern Finland. *Forest ecology and management*, 210(1), 255-266.
- Wagner S., Küssner R., Ammer C., Dohrenbisch A. (2004) Hinweise zur Erfassung von Strahlung und Kronenraumstruktr in Waldbeständen im Rahmen waldbaulicher Untersuchungen. *Forstarchiv*, 75, 110-121.
- Waldstandorte (2013)
<http://map.geo.gr.ch/waldstandorte/> aufgerufen am 29.11.2013.
- Waltert L., Zimmermann S., Blaser P., Luster J., Lüscher P. (2004) Waldböden der Schweiz. Band 1: Grundlagen und Region Jura. WSL, Birmensdorf.
- Weber (2013) mündliche Mitteilung von Hansjörg Weber.
- WP (1903) Waldplan Forstamt Val Müstair, mündliche Mitteilung von Hansjörg Weber.
- WP (1928) Waldplan Forstamt Val Müstair, mündliche Mitteilung von Hansjörg Weber.
- WP (1955) Waldplan Forstamt Val Müstair, mündliche Mitteilung von Hansjörg Weber.
- WP (1984) Waldplan Forstamt Val Müstair, mündliche Mitteilung von Hansjörg Weber.
- Zlatanov T., Schleppi P., Velichkov I., Hinkov G., Georgieva M., Eggertsson O., Zlatanova M., Vacik, H. (2013). Structural diversity of abandoned chestnut (*Castanea sativa* Mill.) dominated forests: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management*, 291, 326-335.

Zweifel, R., Rigling, A., & Dobbertin, M. (2009). Species-specific stomatal response of trees to drought—a link to vegetation dynamics?. *Journal of Vegetation Science*, 20(3), 442-454.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Untersuchungsgebiete: Der obere Kreis kennzeichnet den Lärchenwald und der untere den Fichtenwald (MapGeo 2013).	3
2.2	Bodenprofile: (a) Fichtenwald, Lücke 14 Plot 1 (b) Lärchenwald Lücke 2 Plot 5 (c) Lärchenwald Lücke 5 Plot 1 (M. Walser, WSL; L. Grass) (weiter Fotos von Bodenprofilen Abbildung 8.3-8.18 im Anhang).	4
2.3	Lage der Lücken in den beiden Wäldern. Die obere Karte zeigt den Lärchenwald, die untere den Fichtenwald.	6
2.4	Schematische Darstellung einer Lücke und den fünf Plots (MapGeo 2013).	6
2.5	(a) Lärchenwald, Lücke 7 (b) Fichtenwald, Lücke 15 (L. Grass) (Fotos weiterer Lücken Abbildung 8.19-8.26 im Anhang).	7
2.6	Hemisphärisches Fotos: (a)Fichtenwald, Lücke 11 Plot 5; (b) Lärchenwald, Lücke 5 Plot 4 (L. Grass) (weitere Fotos Abbildung 8.27-8.38 im Anhang).	8
2.7	Fotos der Kategorien 1 bis 4 von links nach rechts in aufsteigender Reihenfolge (L. Grass) (weitere Fotos der Durchwurzelung Abbildung 8.39-8.46 im Anhang.	9
3.1	Lärchenwald: Von der Lücke 3 in Richtung Lücke 5 (M. Walser, WSL).	13
3.2	Foto aus dem Fichtenwald (L. Grass).	14
3.3	Vergleich der Biomasse und des Deckungsgrads der Bodenvegetation zwischen den beiden Wäldern. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das 25 %, respektive das 75 % Quantil, die vertikalen Striche das Maximum respektive das Minimum und die Kreise die Ausreisser. Die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$	15
3.4	Vergleich Biomasse und Deckungsgrad der Bodenvegetation inklusiv Moos zwischen den Plots im Fichtenwald. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das 25 %, respektive das 75 % Quantil, die vertikalen Striche das Maximum, respektive das Minimum und die Kreise die Ausreisser. Die Ergebnisse des Kruskal-Wallis -Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$	16
3.5	Vergleich der Mächtigkeit der Streuauflage zwischen den beiden Wäldern und zwischen den fünf Plots. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das 25 %, respektive das 75 % Quantil, die vertikalen Striche das Maximum, respektive das Minimum und die Kreise die Ausreisser. Die Ergebnisse des Wilcoxon-, beziehungsweise des Kruskal-Wallis-Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$	16

3.6	Vergleich der Lichtverhältnisse zwischen den beiden Wäldern. Fi = Fichtenwald, LÄ = Lärchenwald. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das 25 %, respektive das 75 % Quantil, die vertikalen Striche das Maximum, respektive das Minimum und die Kreise die Ausreisser. Die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$	17
3.7	tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) direkte Strahlung pro m ² im Hang des Lärchenwaldes über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.	18
3.8	tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) direkte Strahlung pro m ² im Hang des Fichtenwaldes über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.	19
3.9	Temperatur auf dem Boden bei den sieben Profilen, von August bis November. Die verschiedenen Farben zeigen die Messungen der verschiedenen Temperatursensoren bei der gleichen Messstelle.	21
3.10	Saugspannung in den sieben Messstellen, in 10 cm Tiefe, von Juni bis Oktober. Die verschiedenen Farben zeigen die Messungen der verschiedenen Sonden bei der gleichen Messstelle.	24
8.1	Bodenaufnahmeprotokoll, erste Seite (WSL)	53
8.2	Bodenaufnahmeprotokoll, zweite Seite (WSL)	54
8.3	Oberboden Fichtenwald, Lücke 14 Plot 1 (M. Walser, WSL)	55
8.4	Profil Fichtenwald, Lücke 14 Plot 1 (M. Walser, WSL)	55
8.5	Oberboden Fichtenwald, Lücke 14 Profil 5 (M. Walser, WSL)	55
8.6	Profil Fichtenwald, Lücke 14 Profil 5 (M. Walser, WSL)	55
8.7	Oberboden Lärchenwald, Lücke 1 Profil 1 (M. Walser, WSL)	56
8.8	Profil Lärchenwald, Lücke 1 Profil 1 (M. Walser, WSL)	56
8.9	Oberboden Lärchenwald, Lücke 2 Profil 1 (M. Walser, WSL)	56
8.10	Profil Lärchenwald, Lücke 2 Profil 1 (M. Walser, WSL)	56
8.11	Oberboden Lärchenwald, Lücke 3 Profil 5 (M. Walser, WSL)	57
8.12	Profil Lärchenwald, Lücke 3 Profil 5 (M. Walser, WSL)	57
8.13	Oberboden Lärchenwald, Lücke 4 Profil 1 (L. Grass)	57
8.14	Profil Lärchenwald, Lücke 4 Profil 1 (L. Grass)	57
8.15	Oberboden Lärchenwald, Lücke 4 Profil 5 (M. Walser, WSL)	58
8.16	Profil Lärchenwald, Lücke 4 Profil 5 (M. Walser, WSL)	58
8.17	Oberboden Lärchenwald, Lücke 5 Profil 5 (M. Walser, WSL)	58
8.18	Profil Lärchenwald, Lücke 5 Profil 5 (M. Walser, WSL)	58
8.19	Lärchenwald Lücke 1 (M. Walser, WSL)	59
8.20	Lärchenwald Lücke 3 (M. Walser, WSL)	59
8.21	Lärchenwald Lücke 4 (M. Walser, WSL)	59
8.22	Lärchenwald Lücke 5 (M. Walser, WSL)	59
8.23	Lärchenwald Lücke 7 (L. Grass)	60
8.24	Lärchenwald Lücke 8 (L. Grass)	60
8.25	Fichtenwald Lücke 14 (L. Grass)	60
8.26	Fichtenwald Lücke 15 (L. Grass)	60
8.27	Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 2 Plot 1 (L. Grass)	61
8.28	Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 2 Plot 3 (L. Grass)	61
8.29	Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 3 Plot 1 (L. Grass)	61
8.30	Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 3 Plot 5 (L. Grass)	61

8.31	Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 4 Plot 1 (L. Grass)	61
8.32	Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 4 Plot 4 (L. Grass)	61
8.33	Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 6 Plot 1 (L. Grass)	62
8.34	Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 6 Plot 3 (L. Grass)	62
8.35	Hemisphärisches Foto: Fichtenwald, Lücke 11 Plot 1 (L. Grass)	62
8.36	Hemisphärisches Foto: Fichtenwald, Lücke 11 Plot 5 (L. Grass)	62
8.37	Hemisphärisches Foto: Fichtenwald, Lücke 14 Plot 1 (L. Grass)	62
8.38	Hemisphärisches Foto: Fichtenwald, Lücke 14 Plot 4 (L. Grass)	62
8.39	Durchwurzelungsintensität: Lärchenwald, Lücke 2 Plot 1; Kategorie 1 (L. Grass)	63
8.40	Durchwurzelungsintensität: Lärchenwald, Lücke 8 Plot 1; Kategorie 1 (L. Grass)	63
8.41	Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 3 Plot 2; Kategorie 2 (L. Grass)	63
8.42	Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 8 Plot 2; Kategorie 2 (L. Grass)	63
8.43	Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 1 Plot 2; Kategorie 3 (L. Grass)	63
8.44	Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 5 Plot 2; Kategorie 3 (L. Grass)	63
8.45	Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 1 Plot 5; Kategorie 4 (L. Grass)	63
8.46	Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 7 Plot 2; Kategorie 4 (L. Grass)	63
8.47	Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 11 Plot 3 (L. Grass)	64
8.48	Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 11 Plot 5 (L. Grass)	64
8.49	Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 16 Plot 1 (L. Grass)	64
8.50	Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 16 Plot 4 (L. Grass)	64
8.51	Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 19 Plot 2 (L. Grass)	65
8.52	Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 19 Plot 5 (L. Grass)	65
8.53	Bodenvegetation: Lärchenwald, Lücke 8 Plot 2 (L. Grass)	65
8.54	Bodenvegetation: Lärchenwald, Lücke 8 Plot 5 (L. Grass)	65
8.55	tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) Sonnenscheindauer im Lärchenwald übers Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.	66
8.56	tägliche (täglich (Durchschnitt über 24 Stunden) Sonnenscheindauer im Fichtenwald übers Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.	67
8.57	tägliche (täglich (Durchschnitt über 24 Stunden) indirekte Strahlung pro m ² im Hang des Lärchenwalds über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.	68
8.58	tägliche (täglich (Durchschnitt über 24 Stunden) indirekte Strahlung pro m ² im Hang des Fichtenwalds übers Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.	69
8.59	Vergleich der Lichtverhältnisse zwischen den beiden Wäldern und zwischen den fünf Plots in den verschiedenen Wäldern. Fi=Fichtenwald, Lä=Lärchenwald. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das obere, respektive das untere Quantil, die vertikale Linie das Maximum, respektive das Minimum und die Kreise die Ausreisser. Die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: *** bei p<0.001, ** bei p<0.01 und * bei p<0.05.	70
8.60	tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) potentielle direkte Strahlung pro m ² im Hang des Lärchenwalds über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.	71
8.61	tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) potentielle direkte Strahlung pro m ² im Hang des Fichtenwalds über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.	72
8.62	tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) potentielle indirekte Strahlung pro m ² im Hang des Lärchenwalds über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.	73
8.63	tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) potentielle indirekte Strahlung pro m ² im Hang des Fichtenwalds über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.	74

8.64	durchschnittliche Saugspannung bei den sieben Messpunkten in 10 cm und in 80 cm Tiefe, von Juni bis Oktober. Die schwarze Linie zeigt den Durchschnitt der drei Sonden in 10 cm Tiefe, die schwarze Linie zeigt den Durchschnitt der beiden Sonden in 80 cm Tiefe.	75
8.65	Bodenwassergehalt übers Jahr. Die waagrechte schwarze Linie markiert den Grenzwert von 0.4 REW (Relativ nutzbares Bodenwasser). Unterhalb von diesem Wert sind die Pflanzen im Trockenstress.	76
8.66	Vergleich der Bodenvegetation mit und ohne Moos zwischen den beiden Wäldern und zwischen den fünf Plots. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das oberer, respektive das untere Quantil und die vertikale Linie markiert das Maximum, respektive das Minimum, die Kreise die Ausreisser. Die Ergebnisse des Wilcox-, beziehungsweise des Kruskal-Wallis-Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: *** bei $p < 0.001$, ** bei $p < 0.01$ und * bei $p < 0.05$. 77	77
8.67	Vergleich der Durchwurzelungsintensität zwischen den beiden Wäldern und zwischen den fünf Plots. Die Grösse der grauen Flächen steht für die Häufigkeit der jeweiligen Kategorie.	78

Tabellenverzeichnis

2.1	Lage der Bodenprofile und der MPS-2 Sonden	7
2.2	Kategorien der Durchwurzelungsintensität	9
3.1	Lageparameter und Bodenvegetation der zehn Lücken im Lärchenwald. Der Deckungsgrad ist der durchschnittliche Deckungsgrad der fünf Plots pro Lücke. Tendenziell ist der hier angegebene Wert geringer als der tatsächliche Deckungsgrad der ganzen Lücke (Daten zur Bodenvegetation Tabelle 8.12-8.16 im Anhang).	14
3.2	Lageparameter und Bodenvegetation der zehn Lücken im Lärchenwald. Der Deckungsgrad ist der durchschnittliche Deckungsgrad der fünf Plots pro Lücke. Tendenziell ist der hier angegebene Wert geringer als der tatsächliche Deckungsgrad der ganzen Lücke (Daten zur Bodenvegetation Tabellen 8.12-8.16 im Anhang).	15
3.3	Durchschnitt aller gemessenen Temperaturwerte und der Durchschnitt der 10 % höchsten Temperaturwerten bei den sieben Messstellen.	20
3.4	Wasserspeicherkapazität (WSpK) bei den zwölf Profilen	22
8.1	Durchschnittlicher Nährstoffgehalt aller Horizonte pro Messstelle, alle Angaben sind in mmol/kg.	85
8.2	Durchschnittliche Basensättigung (BS), organischer Kohlenstoffgehalt (C_org) und Kationenaustauschkapazität (KAK) aller Horizonte und der Durchschnitt der obersten 20 cm des Bodens.	85
8.3	Nährstoffgehalt im Boden bei den sieben Messstellen, alle Angaben sind in mmol/kg.	86
8.4	Basensättigung (BS), austauschbare Protonen (H_exc), organischer Kohlenstoffgehalt (C_org), Kationenaustauschkapazität (KAK) und der pH-Wert im Boden bei den sieben Messstellen.	87
8.5	Korngrößenverteilung pro Horizont bei den zwölf Profilen.	88
8.6	Lagerungsdichte, Porosität und Skelettgehalt des Bodens bei den sieben Messstellen.	89
8.7	durchschnittlicher Global Light Index (GLI) und durchschnittliche Sonnenscheindauer pro Plot.	90
8.8	durchschnittliche direkte und indirekte Strahlung pro Plot.	90
8.9	Sonnenstrahlung bei den sieben Messstellen.	90
8.10	Wasserspeicherkapazität (WSpK), sowie simulierte Trockenheitsindices und Anzahl Trockentage bei den zwölf Messstellen. Ab Trockenheitsindex > 0.4 ist die trockene Waldgrenze erreicht.	91
8.11	Streuaufgabe und Bodenvegetation bei den sieben Messstellen.	91
8.12	durchschnittliche Streuaufgabe und Durchwurzelungsintensität pro Plot.	91
8.13	durchschnittliche Biomasse der Bodenvegetation pro Plot.	92
8.14	durchschnittlicher Deckungsgrad der Bodenvegetation pro Plot.	92
8.15	Deckungsgrad für jeden Plot (Lärchenwald).	92

1. Allgemeine Daten

Projekt	Landeskarte 1:25'000	Koordinaten	Datum
BfNr-Nr.		Wetter (Code)	

Codes Wetter
 1 schön
 2 teilweise sonnig
 3 leicht bewölkt
 4 stark bewölkt
 5 unbeständig
 6 Regen; Schneefall
 7 Nebel

2. Bodenbildungsfaktoren

Höhe (l. Meer (m))	Exposition	Hangneigung (%)	Mikrorelief (Code)
Relief (Code)		Relief (Code)	
Geologie		Einheit Bodenlegende	

Codes Relief
Relief
 1 flaches Gelände
 2 Kuppe/Oberhang
 3 Mittelhang
 4 Hangfluss, Mulde
 5 unbestimmt
Mikrorelief
 1 gleichmäßig stark parabol
 2 stark parabol

3. Angaben zur Vegetation

Waldgesellschaft nach ELLENBERG und KLÖTZLI (1972)

Klusterungsgrundlage der Waldgesellschaft

Standortkarte Schätzung aufgrund Vegetationsaspekt

Vegetationsaufnahme und Vegetationsschlüssel Schätzung aufgrund Vegetationsaspekt und Bodenmerkmalen

Standortansprache mit Vegetations- und Bodenschlüssel

Bestandsbeschreibung

Baumarten und -anteile (%):

Baumhöhen und -alter:

Waldstruktur:

Deckungswerte

Baumdeckungsanteil:% Strauchschicht:% Zweiggedächter:%

Krautschicht:% Moosschicht:%

Bewirtschaftung

heute:

früher:

4. Variabilität der Humusform im Bestand

Vermischungsstärke (cm)	L-F-H-Ahh-(E)Ah	L-F-Ahh-Ah	L-Ah	Mull
2	4	6	8	1
4	6	8	10	2
6	8	10	12	3
8	10	12	14	4
10	12	14	16	5
12	14	16	18	6
14	16	18	20	7
16	18	20	22	8
18	20	22	24	9
20	22	24	26	10
22	24	26	28	11
24	26	28	30	12
26	28	30	32	13
28	30	32	34	14
30	32	34	36	15
32	34	36	38	16
34	36	38	40	17

5. Profilfärbung und Vernässungstendenz mit Eintrag ins Oeko-Typogramm Mineralerde:

Ah-C	(B)	(Bca)	Bv	E-Bt	E-Bh-Ble	G/S
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←	←	←	←	←
↓	←	←				



Abbildung 8.3: Oberboden Fichtenwald, Lücke 14 Plot 1 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.4: Profil Fichtenwald, Lücke 14 Plot 1 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.5: Oberboden Fichtenwald, Lücke 14 Profil 5 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.6: Profil Fichtenwald, Lücke 14 Profil 5 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.7: Oberboden Lärchenwald, Lücke 1 Profil 1 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.8: Profil Lärchenwald, Lücke 1 Profil 1 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.9: Oberboden Lärchenwald, Lücke 2 Profil 1 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.10: Profil Lärchenwald, Lücke 2 Profil 1 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.11: Oberboden Lärchenwald, Lücke 3 Profil 5 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.12: Profil Lärchenwald, Lücke 3 Profil 5 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.13: Oberboden Lärchenwald, Lücke 4 Profil 1 (L. Grass)



Abbildung 8.14: Profil Lärchenwald, Lücke 4 Profil 1 (L. Grass)



Abbildung 8.15: Oberboden Lärchenwald, Lücke 4 Profil 5 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.16: Profil Lärchenwald, Lücke 4 Profil 5 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.17: Oberboden Lärchenwald, Lücke 5 Profil 5 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.18: Profil Lärchenwald, Lücke 5 Profil 5 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.19: Lärchenwald Lücke 1 (M. Walser, WSL)

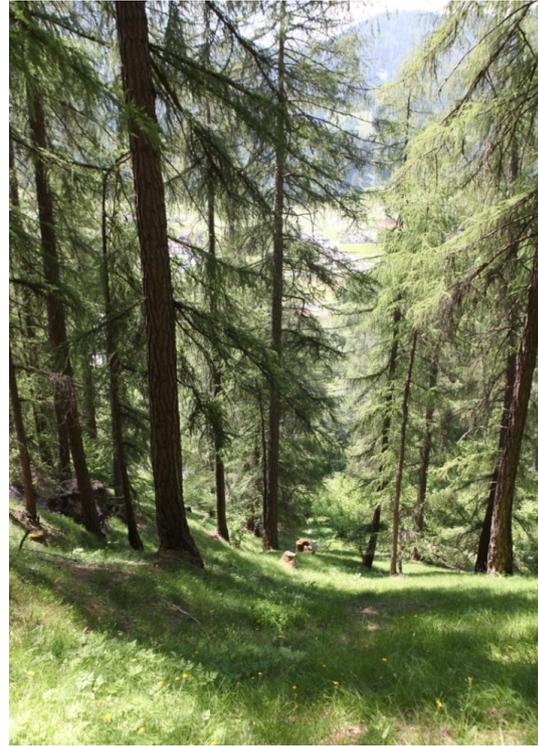


Abbildung 8.20: Lärchenwald Lücke 3 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.21: Lärchenwald Lücke 4 (M. Walser, WSL)

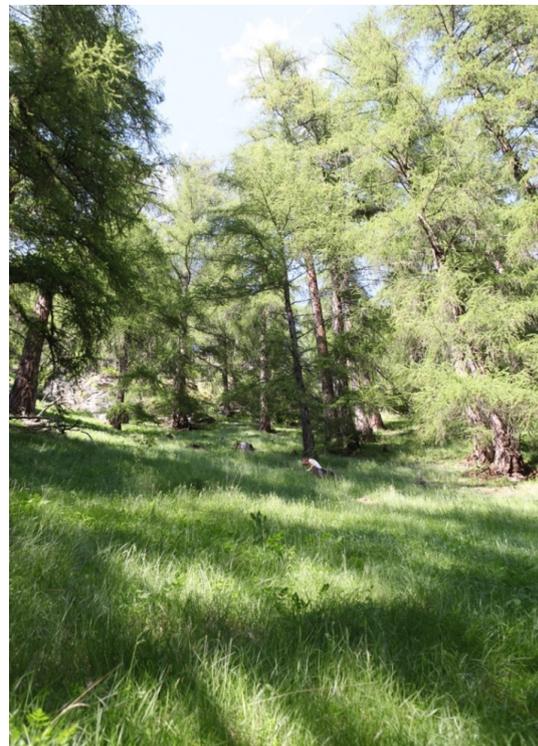


Abbildung 8.22: Lärchenwald Lücke 5 (M. Walser, WSL)



Abbildung 8.23: Lärchenwald Lücke 7 (L. Grass)

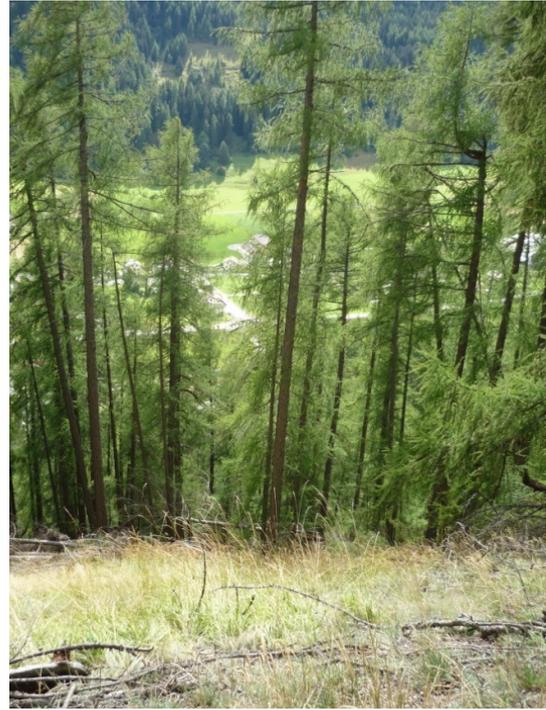


Abbildung 8.24: Lärchenwald Lücke 8 (L. Grass)



Abbildung 8.25: Fichtenwald Lücke 14 (L. Grass)



Abbildung 8.26: Fichtenwald Lücke 15 (L. Grass)



Abbildung 8.27: Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 2 Plot 1 (L. Grass)



Abbildung 8.28: Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 2 Plot 3 (L. Grass)



Abbildung 8.29: Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 3 Plot 1 (L. Grass)



Abbildung 8.30: Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 3 Plot 5 (L. Grass)



Abbildung 8.31: Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 4 Plot 1 (L. Grass)



Abbildung 8.32: Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 4 Plot 4 (L. Grass)



Abbildung 8.33: Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 6 Plot 1 (L. Grass)



Abbildung 8.34: Hemisphärisches Foto: Lärchenwald, Lücke 6 Plot 3 (L. Grass)



Abbildung 8.35: Hemisphärisches Foto: Fichtenwald, Lücke 11 Plot 1 (L. Grass)



Abbildung 8.36: Hemisphärisches Foto: Fichtenwald, Lücke 11 Plot 5 (L. Grass)



Abbildung 8.37: Hemisphärisches Foto: Fichtenwald, Lücke 14 Plot 1 (L. Grass)



Abbildung 8.38: Hemisphärisches Foto: Fichtenwald, Lücke 14 Plot 4 (L. Grass)



Abbildung 8.39: Durchwurzelungsintensität: Lärchenwald, Lücke 2 Plot 1; Kategorie 1 (L. Grass)



Abbildung 8.40: Durchwurzelungsintensität: Lärchenwald, Lücke 8 Plot 1; Kategorie 1 (L. Grass)



Abbildung 8.41: Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 3 Plot 2; Kategorie 2 (L. Grass)



Abbildung 8.42: Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 8 Plot 2; Kategorie 2 (L. Grass)



Abbildung 8.43: Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 1 Plot 2; Kategorie 3 (L. Grass)



Abbildung 8.44: Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 5 Plot 2; Kategorie 3 (L. Grass)



Abbildung 8.45: Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 1 Plot 5; Kategorie 4 (L. Grass)



Abbildung 8.46: Durchwurzelungsintensität: Fichtenwald, Lücke 7 Plot 2; Kategorie 4 (L. Grass)



Abbildung 8.47: Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 11 Plot 3 (L. Grass)



Abbildung 8.48: Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 11 Plot 5 (L. Grass)



Abbildung 8.49: Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 16 Plot 1 (L. Grass)

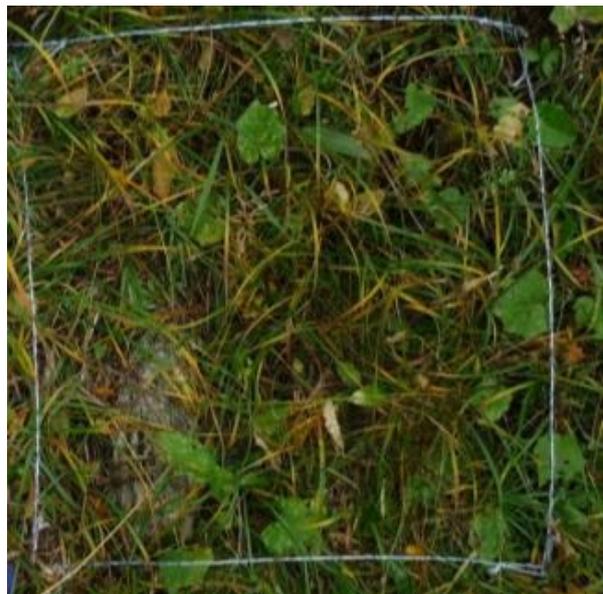


Abbildung 8.50: Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 16 Plot 4 (L. Grass)



Abbildung 8.51: Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 19 Plot 2 (L. Grass)



Abbildung 8.52: Bodenvegetation: Fichtenwald, Lücke 19 Plot 5 (L. Grass)



Abbildung 8.53: Bodenvegetation: Lärchenwald, Lücke 8 Plot 2 (L. Grass)



Abbildung 8.54: Bodenvegetation: Lärchenwald, Lücke 8 Plot 5 (L. Grass)

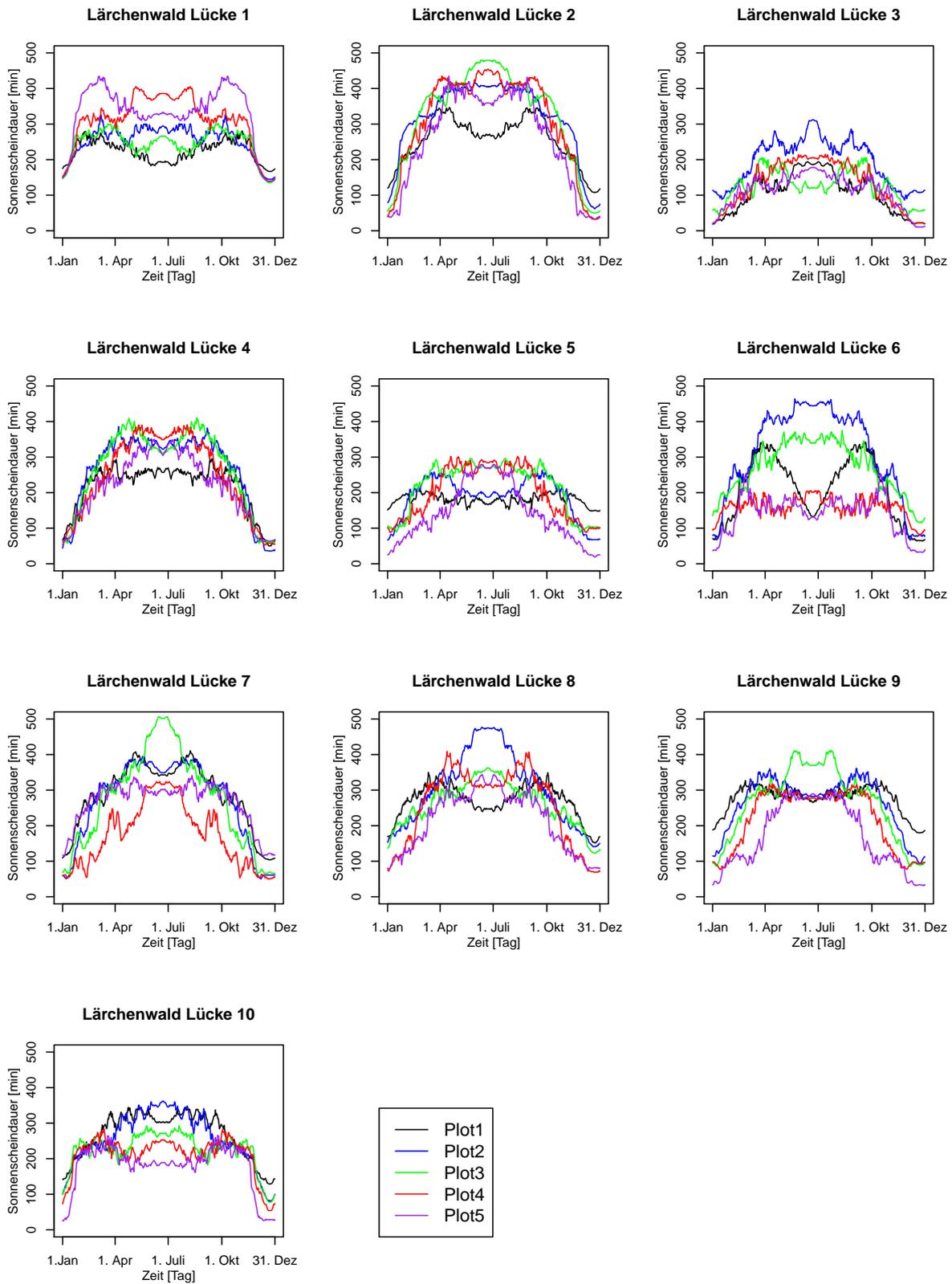


Abbildung 8.55: tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) Sonnenscheindauer im Lärchenwald übers Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.

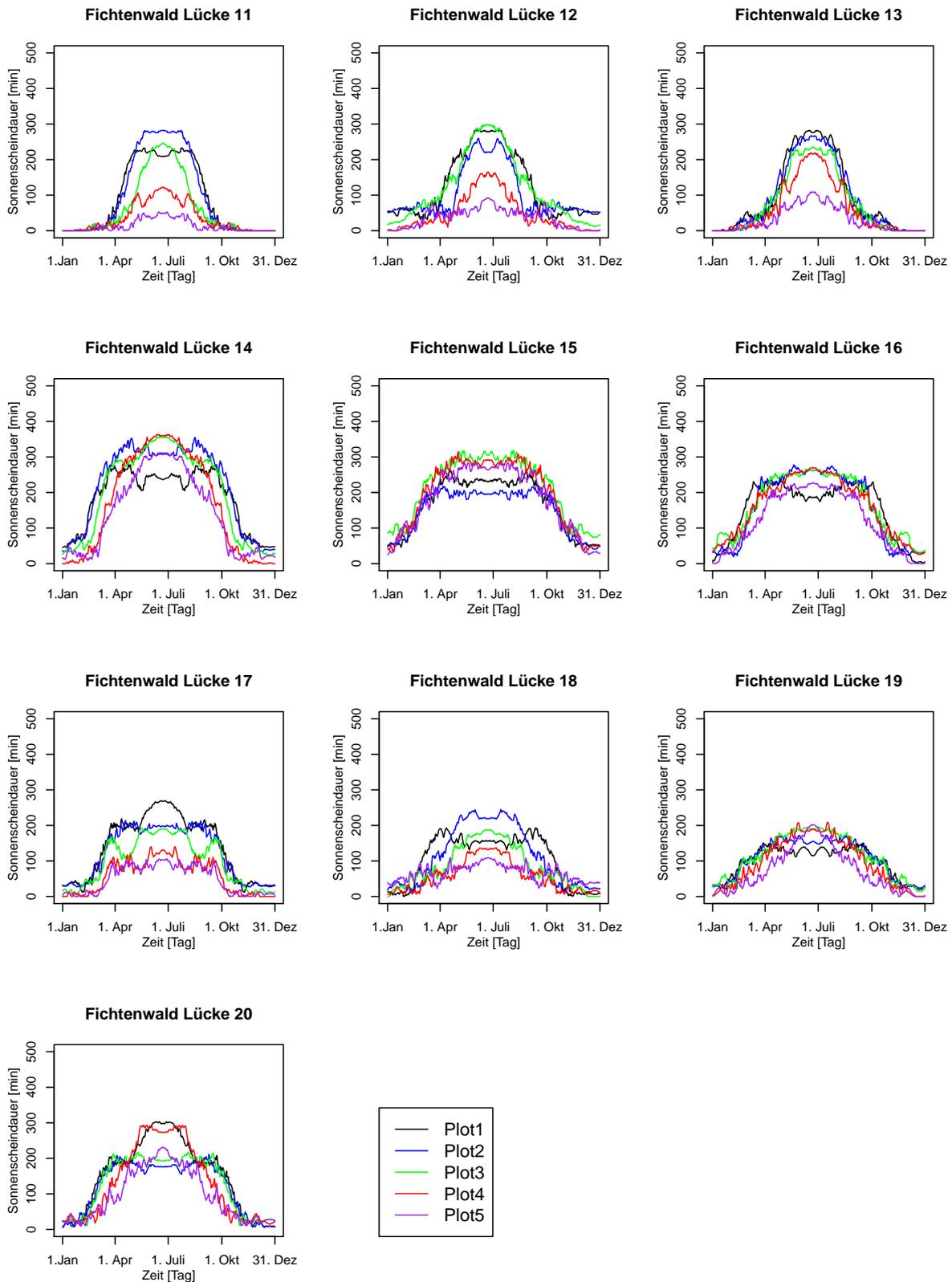


Abbildung 8.56: tägliche (tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) Sonnenscheindauer im Fichtenwald übers Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.

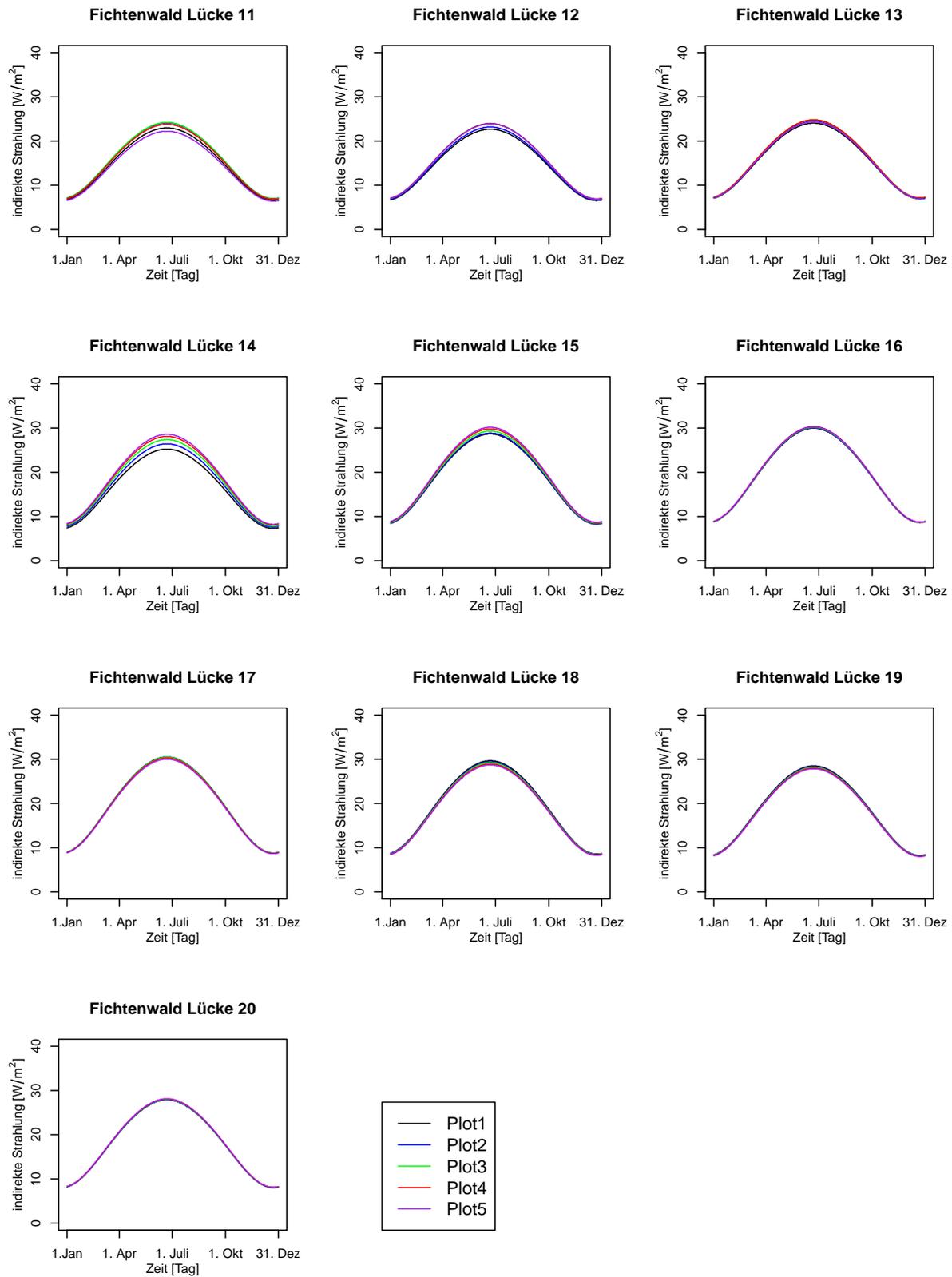


Abbildung 8.58: tägliche (tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) indirekte Strahlung pro m^2 im Hang des Fichtenwalds übers Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.

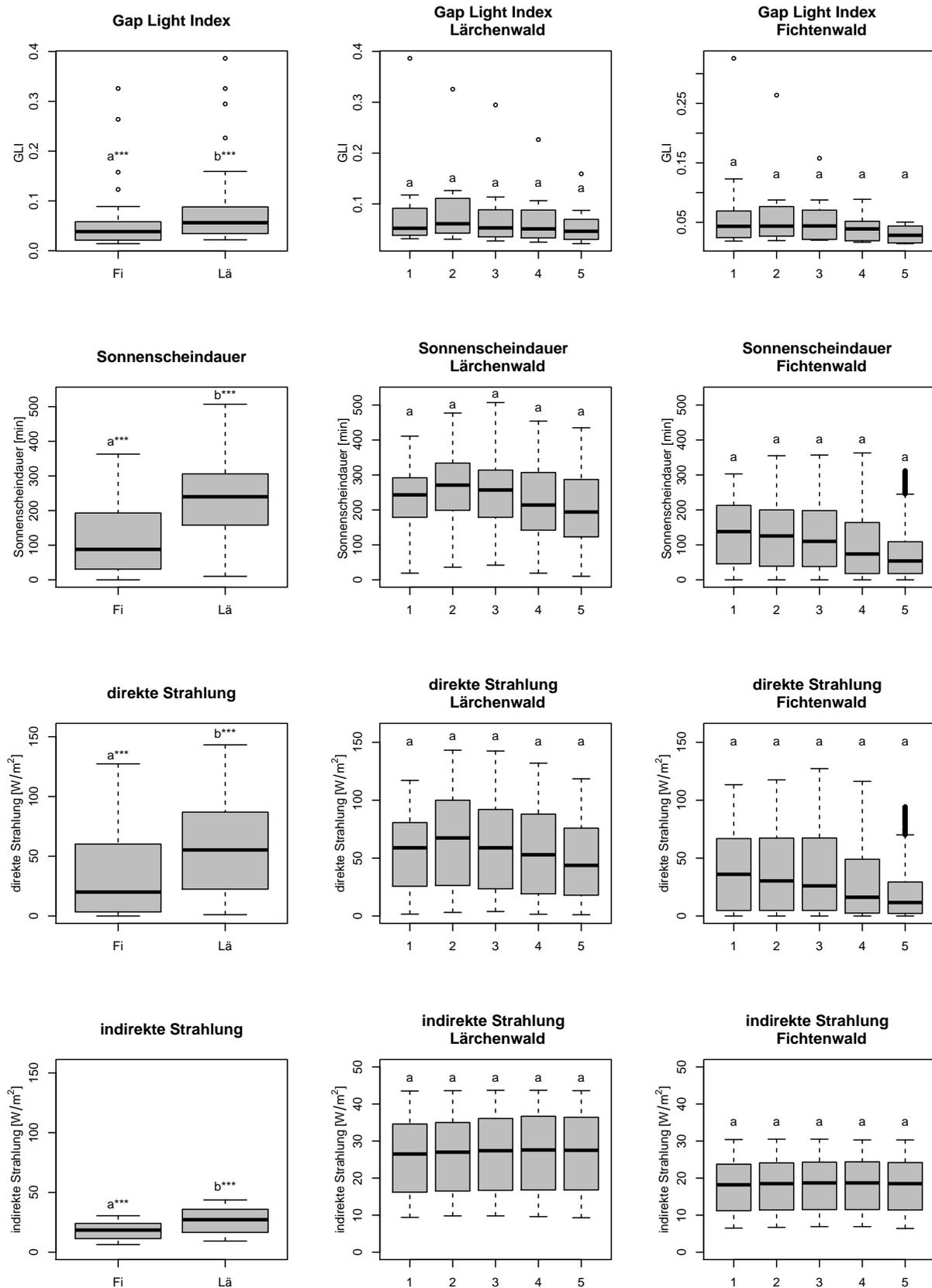


Abbildung 8.59: Vergleich der Lichtverhältnisse zwischen den beiden Wäldern und zwischen den fünf Plots in den verschiedenen Wäldern. Fi=Fichtenwald, Lä=Lärchenwald. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das obere, respektive das untere Quantil, die vertikale Linie das Maximum, respektive das Minimum und die Kreise die Ausreisser. Die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: *** bei $p < 0.001$, ** bei $p < 0.01$ und * bei $p < 0.05$.

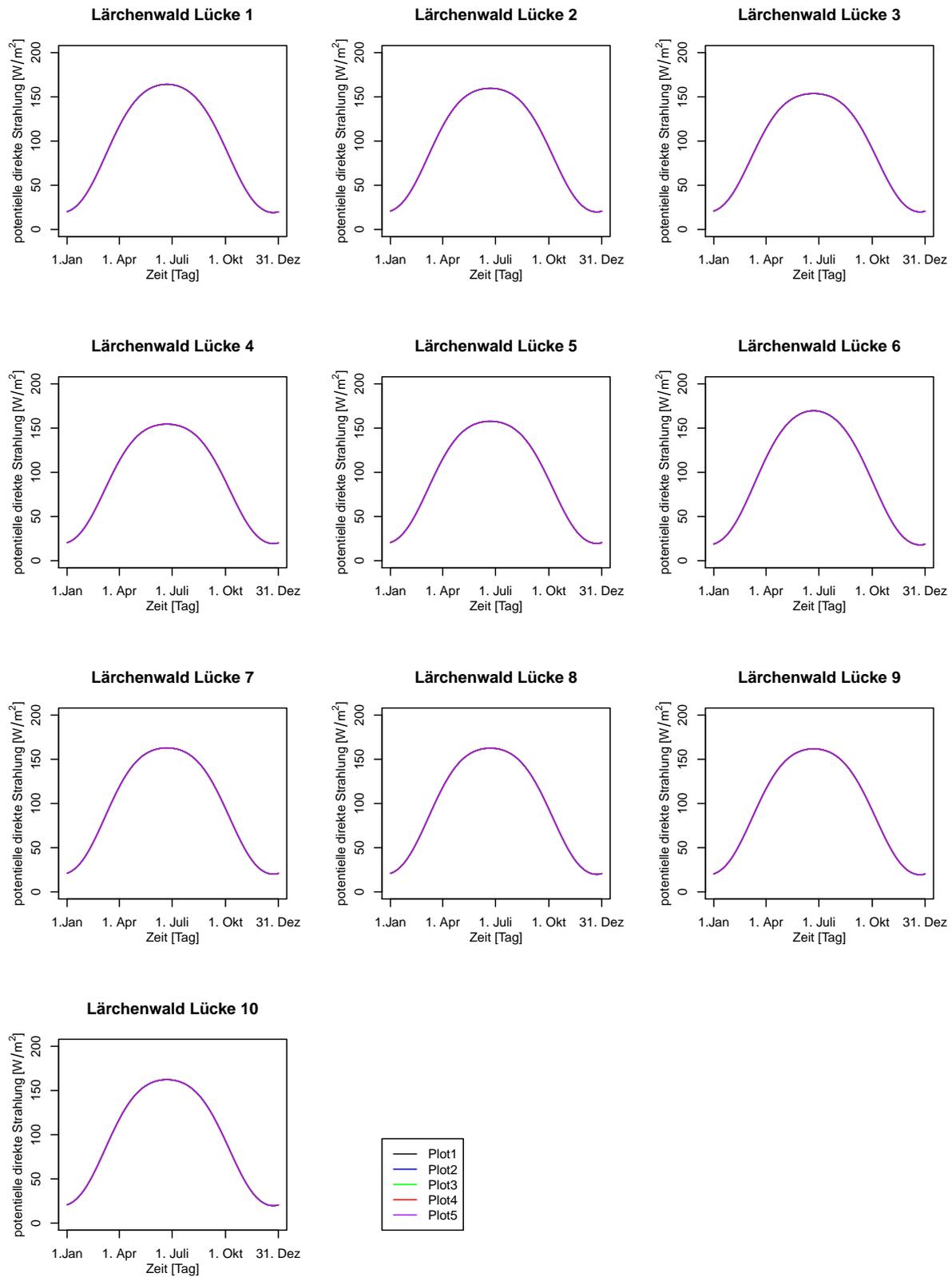


Abbildung 8.60: tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) potentielle direkte Strahlung pro m² im Hang des Lärchenwalds über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.

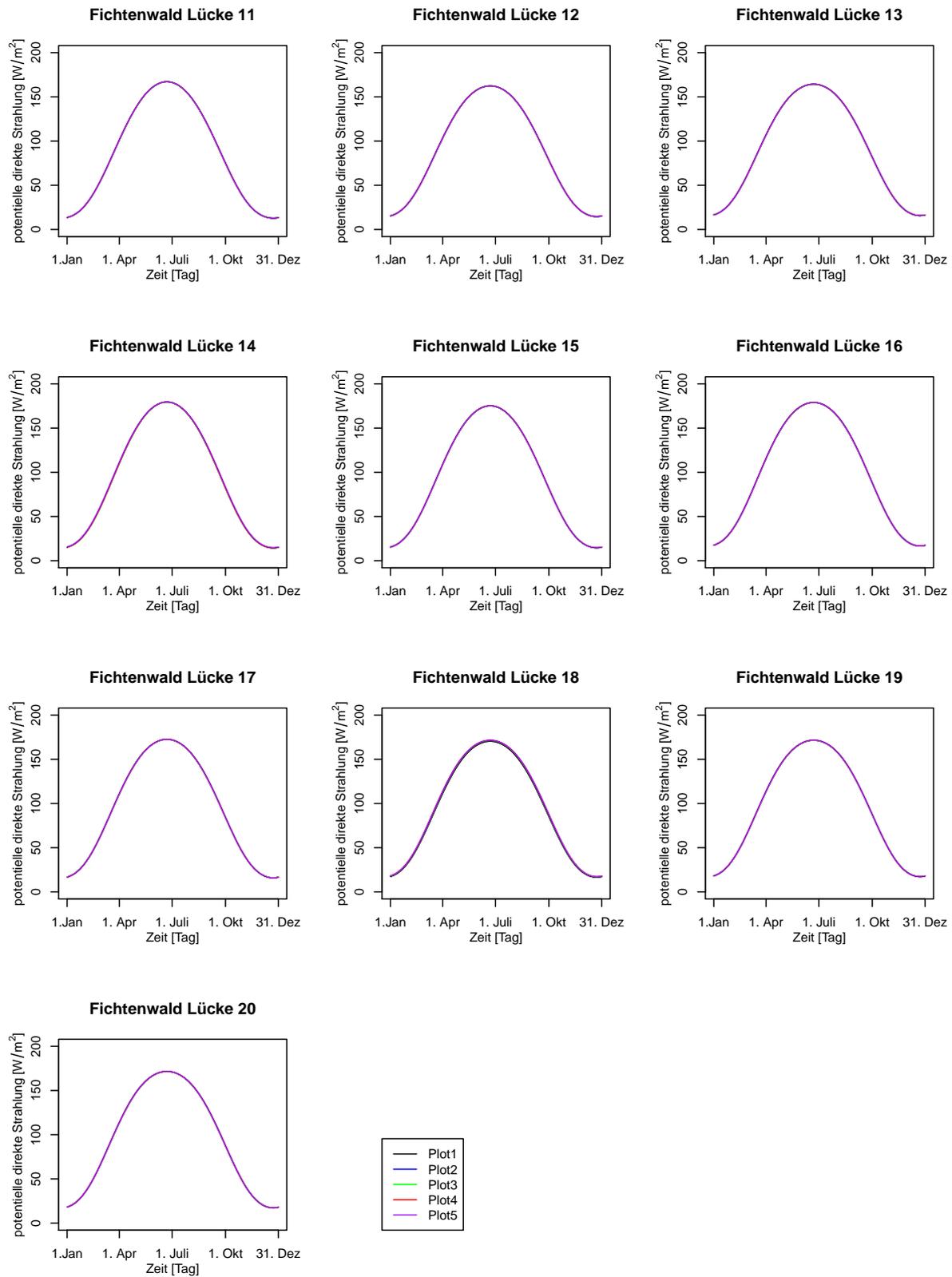


Abbildung 8.61: tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) potentielle direkte Strahlung pro m^2 im Hang des Fichtenwalds über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.

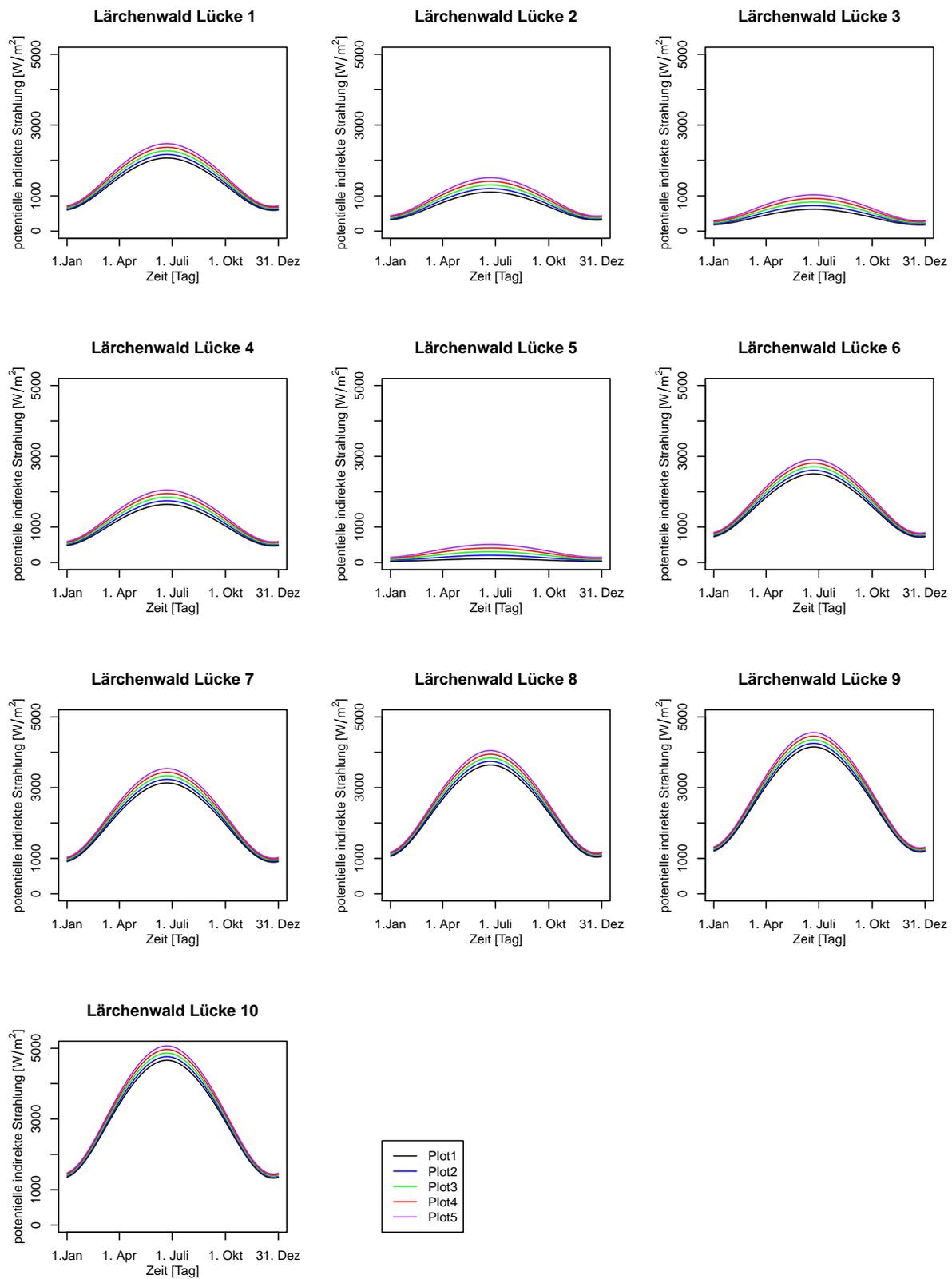


Abbildung 8.62: tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) potentielle indirekte Strahlung pro m^2 im Hang des Lärchenwalds über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.

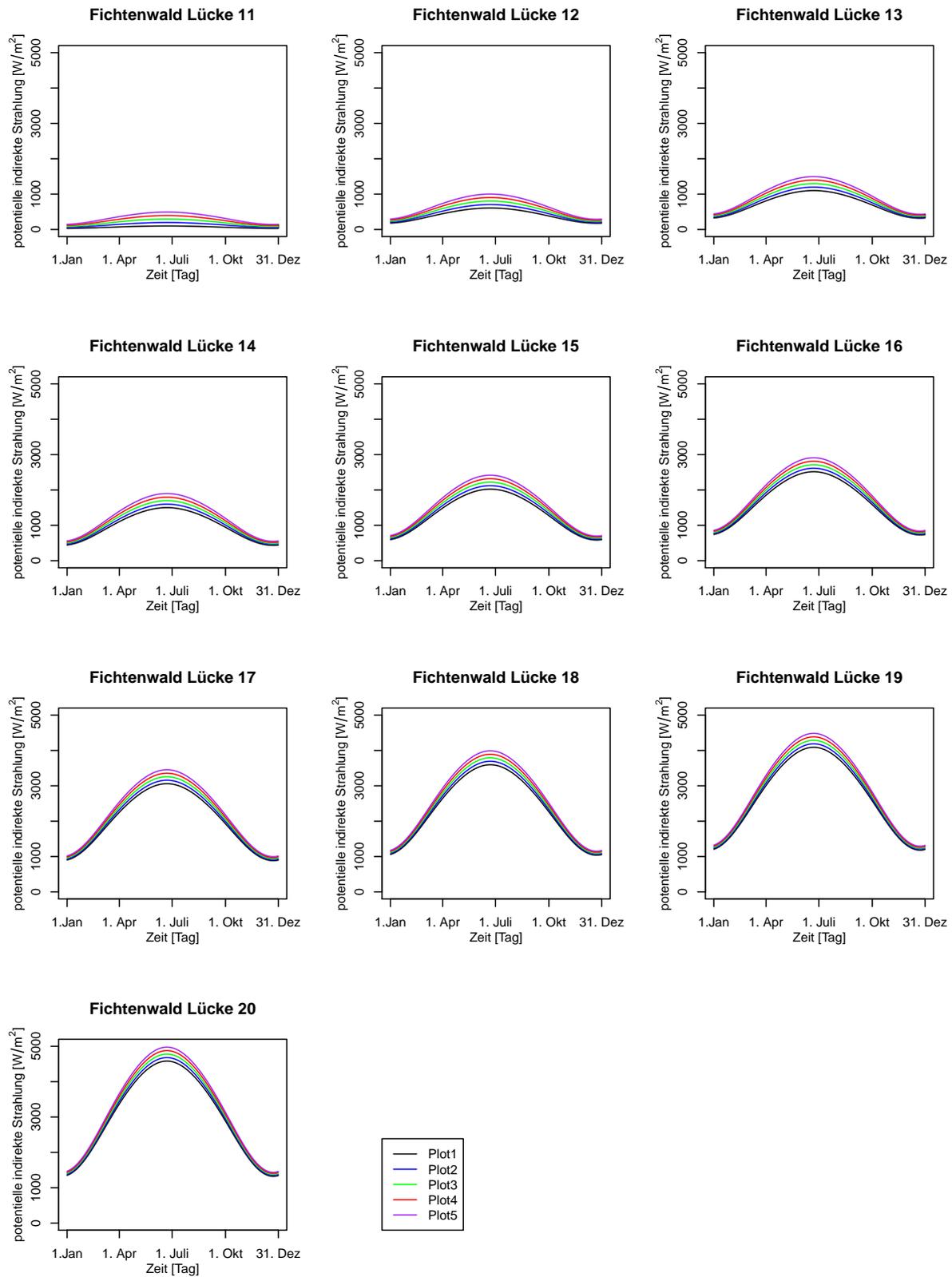


Abbildung 8.63: tägliche (Durchschnitt über 24 Stunden) potentielle indirekte Strahlung pro m^2 im Hang des Fichtenwalds über ein Jahr. Jede Grafik zeigt eine Lücke mit den jeweiligen fünf Plots.

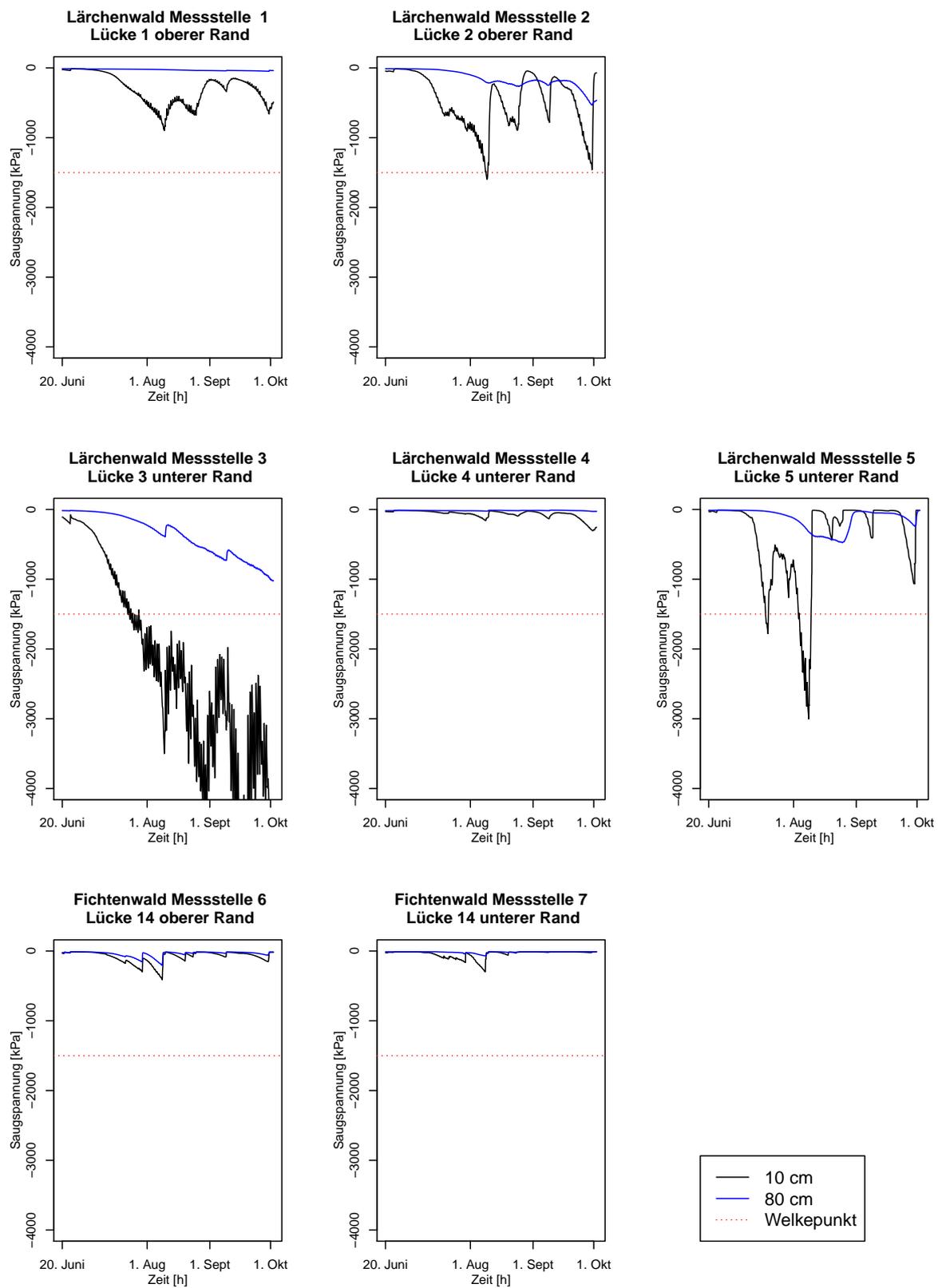


Abbildung 8.64: durchschnittliche Saugspannung bei den sieben Messpunkten in 10 cm und in 80 cm Tiefe, von Juni bis Oktober. Die schwarze Linie zeigt den Durchschnitt der drei Sonden in 10 cm Tiefe, die schwarze Linie zeigt den Durchschnitt der beiden Sonden in 80 cm Tiefe.

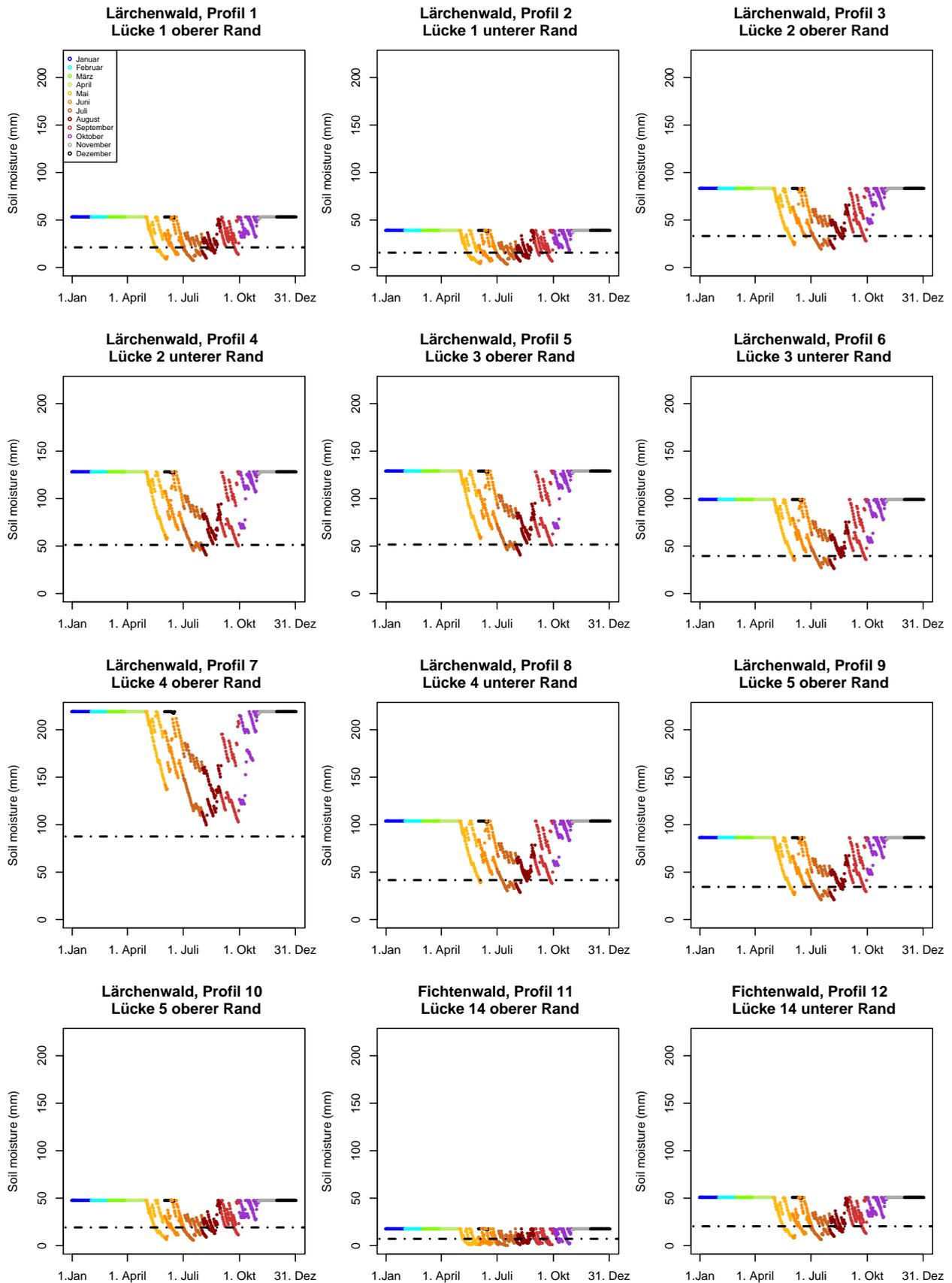


Abbildung 8.65: Bodenwassergehalt übers Jahr. Die waagrechte schwarze Linie markiert den Grenzwert von 0.4 REW (Relativ nutzbares Bodenwasser). Unterhalb von diesem Wert sind die Pflanzen im Trockenstress.

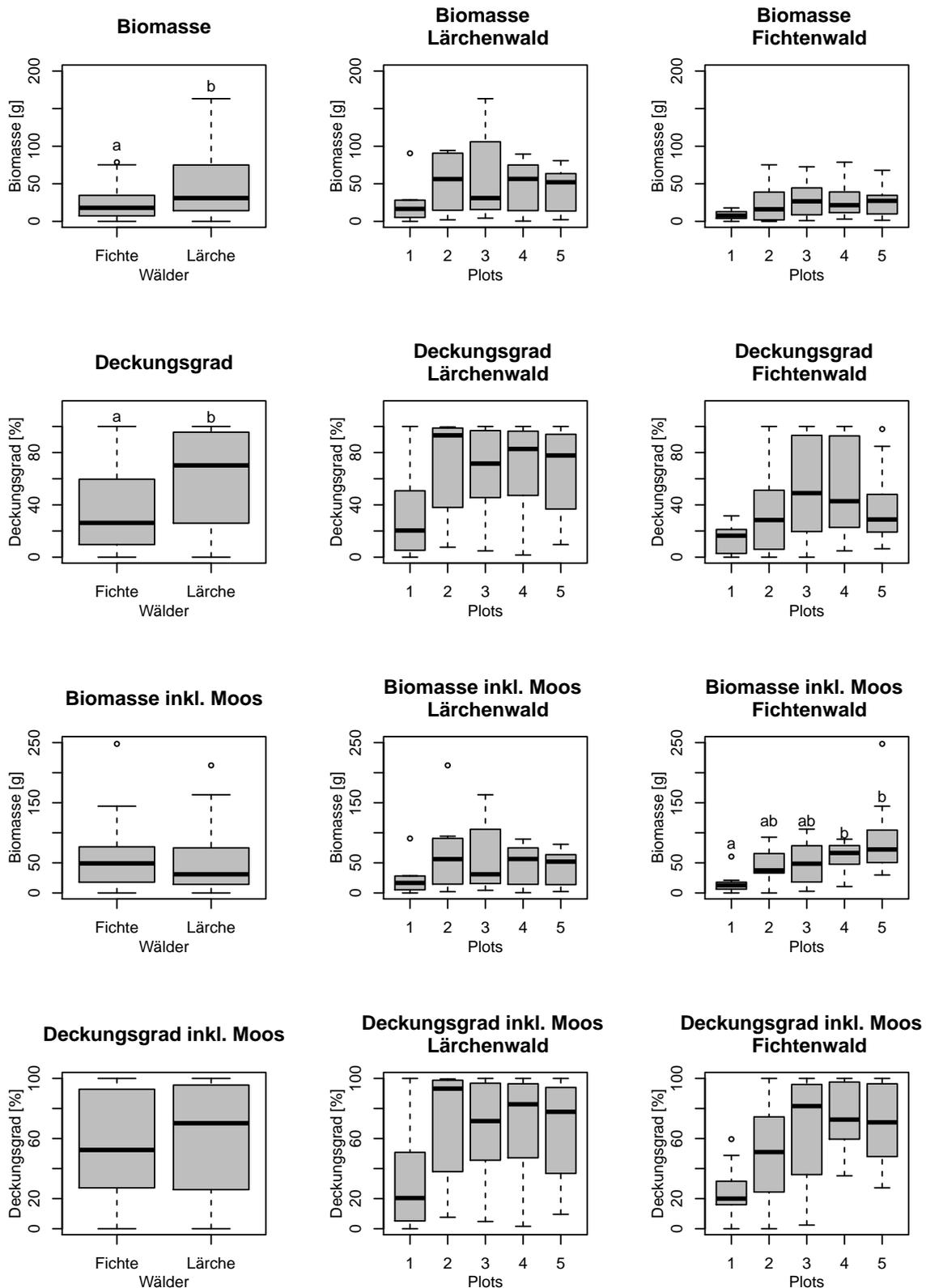


Abbildung 8.66: Vergleich der Bodenvegetation mit und ohne Moos zwischen den beiden Wäldern und zwischen den fünf Plots. Die horizontale Linie markiert den Mittelwert, der graue Bereich das obere, respektive das untere Quantil und die vertikale Linie markiert das Maximum, respektive das Minimum, die Kreise die Ausreisser. Die Ergebnisse des Wilcox-, beziehungsweise des Kruskal-Wallis-Tests sind oberhalb der Boxplots vermerkt. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede. Signifikanzniveau: *** bei $p < 0.001$, ** bei $p < 0.01$ und * bei $p < 0.05$.

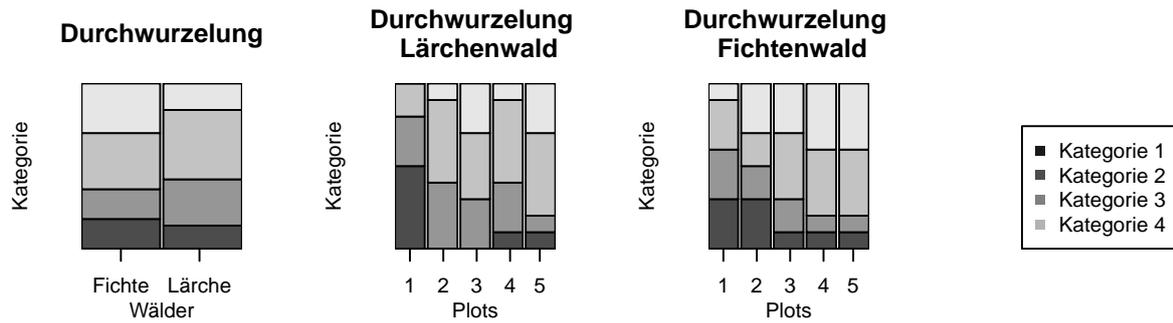


Abbildung 8.67: Vergleich der Durchwurzelungsintensität zwischen den beiden Wäldern und zwischen den fünf Plots. Die Grösse der grauen Flächen steht für die Häufigkeit der jeweiligen Kategorie.

8.2 R-Code

8.2.1 Bodenwasser - Modell

```

1
2 # R-code calculation Daily Potential Evapotranspiration - Soil Water Deficit
3
4 setwd("F:/Masterarbeit/R_Masterarbeit")
5 data=read.table("F:/Masterarbeit/R_Masterarbeit/STAMaria.txt",header=T)
6 # Site elevation
7 Alt=1500
8 # Soil water capacity (Bucket size, in mm)
9 BS=21
10 # Day of the year for budburst and leaf fall respectively
11 leaf_start=121; leaf_end=304
12
13 #####
14 # Daily ETP using simplified Penman-Monteith equation
15 # Monthly ETP cannot be calculated using Thornthwaite scheme
16 #####
17
18 dailydata=aggregate(data[,7],by=list(data[,4],data[,3],data[,2]),FUN=mean)
19 dailydata=cbind(dailydata,aggregate(cbind(data[,8],data[,10]),by=list(data[,4],data[,3],data[,2]),FUN=
20   sum)[,4:5])
21 colnames(dailydata)=c("day","month","year","Tmean","R","Rs")
22
23 dailydata$Rs=dailydata$Rs*3.6/1000 # if solar radiation is in Wh/m2
24
25 # Simplified Penman Monteith (Gutierrez in prep) + dailyLPJ (Venesky 2007)
26 ETP_Pen=function(Tmean,Rn,Alt) {P=101.3*(((293-0.0065*Alt)/293)^5.26) # in kPa
27   latentheat=(2.501 - 0.002361*Tmean) # in MJ/kg
28   psycho=0.0016286 * P/latentheat
29   delta=4098*0.6108*exp(17.269*Tmean/(237.3+Tmean)) / ((237.3+Tmean)^2)
30   ETP=(delta/(delta+psycho)*Rn)/latentheat; ETP} # Rn in MJ/m2/
31   day
32
33 dailyETP_Pen=NULL
34 for (i in 1:nrow(dailydata))
35 {Rn=(1-0.15)*dailydata$Rs[i] # Net radiation considering albedo of 0.15
36   dailyETP_Pen[i]=ETP_Pen(dailydata$Tmean[i],Rn,Alt) # in mm/day
37 }
38
39 #####
40 # Daily evolution of soil moisture and calculation of drought indices
41 #####

```

```

40 Cw=4 # Maximum evapotranspiration rate according to Baldocchi 2011 (mm/day)
41 kIcpt=0.3 # Rainfall interception
42
43 Pi=NULL; S=NULL; SM=rep(BS,nrow(dailydata)); D=NULL; E=NULL; vAET=NULL; vDr=NULL; vSM=NULL ; SWD=NULL
44 days=NULL; init=151;
45 for (i in 1:nrow(dailydata))
46 {if (dailydata$day[i]==1 & dailydata$month[i]==1) {init=0}
47   days[i]=init+1
48   init=init+1
49 }
50
51 for (i in 1:nrow(dailydata))
52
53 {
54   DOY=days[i] # Day Of the Year
55
56   P=dailydata$R[i]
57   Pi[i] = min(c(kIcpt * P, dailyETP_Pen[i]))
58   Ps = P - Pi[i];
59   S[i] = min(c(BS, Cw)) * SM[i] / BS
60   D[i] = dailyETP_Pen[i] - Pi[i]
61
62   # No evaporation when Tmean < 0
63   if (dailydata$Tmean[i]<0) {D[i] = 0}
64   # No evaporation before budburst and after leaf fall
65   if (DOY<leaf_start) {D[i] = 0} ; if (DOY>leaf_end) {D[i] = 0}
66
67   E[i] = min(c(S[i], D[i]))
68
69   ## Soil moisture
70   if (i < nrow(dailydata)) {SM[i + 1] = max(c(min(c(SM[i] + (Ps - E[i]), BS)), 0))}
71
72   ## actual evapotranspiration
73   vAET[i] = E[i] + Pi[i];
74
75   ## SWD: Soil Water Deficit according to Granier et al. 1999
76   SWD[i] = 0.4*BS-SM[i] ; if (SWD[i]<0) {SWD[i]=0}
77   vSM[i] = SM[i]
78   }
79
80 # Number of drought days (days when SWD < 0.4*BS)
81 DrD = length(which(SWD!=0)); DrD
82
83 # Drought intensity: Area under the 0.4 line; 0<DrI<1
84 MaxSWD = (leaf_end - leaf_start)*0.4*BS
85 SWD_tot = sum(SWD)
86 DrI = SWD_tot / MaxSWD; DrI
87
88
89 #####
90 # Plot soil moisture evolution over time
91 #####
92
93 # Color determination
94 colo=NULL
95 for (i in 1:nrow(dailydata))
96 {if (dailydata$mon[i]==1) {colo[i]="blue"}; if (dailydata$mon[i]==2) {colo[i]="cyan"}; if (dailydata$mon[
97   i]==3) {colo[i]="chartreuse"}; if (dailydata$mon[i]==4) {colo[i]="darkolivegreen2"}; if (dailydata$
98   mon[i]==5) {colo[i]="darkgoldenrod1"}; if (dailydata$mon[i]==6) {colo[i]="darkorange"}; if (
99   dailydata$mon[i]==7) {colo[i]="chocolate3"}; if (dailydata$mon[i]==8) {colo[i]="darkred"}; if (
100  dailydata$mon[i]==9) {colo[i]="brown3"}; if (dailydata$mon[i]==10) {colo[i]="darkorchid3"}; if (
101  dailydata$mon[i]==11) {colo[i]="darkgrey"}; if (dailydata$mon[i]==12) {colo[i]="black"}}

```

```

102 plot(days, vSM, pch=16, cex=0.6, col=colo, ylim=c(0,220), main="Profil 1 \n Luecke 1 oberer Rand", xlab="Day of
      the Year", ylab="Soil moisture (mm)", xaxt="n")
103 lines(c(-10,4000), c(0.4*BS, 0.4*BS), lwd=2, lty=4)
104 axis(1, at=c(1,91,182,274,365), labels=c('1. Jan', '1. April', '1. Juli', '1. Okt', '31. Dez'))
105 legend("topleft", c("Januar", "Februar", "Maerz", "April", "Mai", "Juni", "Juli", "August", "September", "Oktober",
      "November", "Dezember"), pch=c(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1), col=c("blue", "cyan", "chartreuse", "darkolivegreen2", "darkgoldenrod1", "darkorange", "chocolate3", "darkred", "brown3", "darkorchid3", "darkgrey", "black"), cex=0.6)
106
107 dev.off()

```

Rcode_DailyETP.R

8.2.2 statistische Auswertung

```

1  ##Text-File einlesen, beim einlesen erste Zeile ueberspringen
2  dat <- read.table("F:/Masterarbeit/R_Masterarbeit/Daten.txt", header=TRUE, skip=1)
3
4  # Umwandlung in Faktoren: Daten die als Faktoren vorliegen, als Faktoren definieren
5  dat$Luecke <- as.factor(dat$Luecke)
6  dat$Plot <- as.factor(dat$Plot)
7  dat$Nr <- as.factor(dat$Nr)
8  dat$Wurzel <- as.factor(dat$Wurzel)
9  dat$Verjuengung <- as.factor(dat$Verjuengung)
10 #Deckung=Deckungsgrad kraeutige Bodenvegetation
11 #DeckungMoos=Deckungsgrad Bodenveg. inkl. Moos
12 #Masse=Biomasse kraeutige Bodenvegetation
13 #MasseMoos=Biomasse Bodenveg. inkl. Moos
14 #Streu= Maechtigkeit Streuauflage
15 #Wurzel= Durchwurzelungsintensitaet
16 #WSpK=Wasserspeicherkapazitaet
17
18 ##Text-File mit Daten zu Sonnenscheindauer, direkter und indirekter Strahlung einlesen
19 Licht <- read.table("F:/Masterarbeit/R_Masterarbeit/Hemisferfotos.txt", header=TRUE)
20
21 #Neue Spalte, 1 bis 20 durchnummeriert, damit jede Luecke andere Nr hat
22 Licht$Nr <- rep(c(1:20), each=1825)
23 # nur Tage waehrend schneefreier Zeit
24 Schneefrei <- subset(Licht, jours > 120 & jours < 305)
25 # effektive direkte und indirekte Strahlung addieren
26 Schneefrei$eff <- Schneefrei$Dneff + Schneefrei$Bneff
27 # potentielle direkte und indirekte Strahlung addieren
28 Schneefrei$pot <- Schneefrei$Dnpot + Schneefrei$Bnpot
29 # potentielle Strahlung der 365 Tage pro Plot aufsummieren
30 Summe <- aggregate(pot ~ Wald + Luecke + Plot, Schneefrei, sum)
31 # effektive Strahlung der 365 Tage pro Plot aufsummieren
32 SumEff <- aggregate(eff ~ Wald + Luecke + Plot, Schneefrei, sum)
33 #Tabelle der effektiven Strahlung in die der potentiellen einfuegen
34 Summe$eff <- SumEff$eff
35 #GLI (Gap Light Index) = Summe von eff / Summe von pot
36 Summe$GLI <- Summe$eff / Summe$pot
37
38 #Bneff=effektive direkte Strahlung
39 #Dneff=effektive indirekte Strahlung
40 #tB=Sonnenscheindauer der direkten Strahlung
41 #Bnpot=potentielle direkte Strahlung
42 #Dnpot=potentielle indirekte Strahlung
43
44 #Package doBy laden
45 library(doBy)
46 #Mittelwert dir. Strahlung aller 365 Tage pro Plot
47 tmp <- summaryBy(Bneff ~ Nr + Wald + Plot, data=Licht, FUN=mean)
48 #Mittelwert indir. Strahlung aller 365 Tage pro Plot
49 tmp2 <- summaryBy(Dneff ~ Nr + Wald + Plot, data=Licht, FUN=mean)
50 #Mittelwert Sonnenscheindauer aller 365 Tage pro Plot
51 tmp3 <- summaryBy(tB ~ Nr + Wald + Plot, data=Licht, FUN=mean)

```

```

52
53 #Mittelwert dir. Strahlung aller Schneefreien Tage pro Plot
54 vegperiode<- summaryBy(Bneff ~ Nr+Wald+Plot, data=Schneefrei, FUN=mean)
55 #Mittelwert indir. Strahlung aller Schneefreien Tage pro Plot
56 vegperiode2<- summaryBy(Dneff ~ Nr+Wald+Plot, data=Schneefrei, FUN=mean)
57 #Mittelwert Sonnenscheindauer aller Schneefreien Tage pro Plot
58 vegperiode3<- summaryBy(tB ~ Nr+Wald+Plot, data=Schneefrei, FUN=mean)
59
60 #####
61
62 # Histogramme um zu schauen ob Daten normalverteilt sind (sie sind es nicht)
63 hist(dat$Deckung)
64 hist(dat$DeckungMoos)
65 hist(dat$Hoehe)
66 hist(dat$Masse)
67 hist(dat$MasseMoos)
68 hist(dat$Streu)
69 hist(dat$WSpK)
70 hist(Summe$GLI)
71 hist(tmp$Bneff)
72 hist(tmp2$Dneff)
73 hist(tmp3$tB)
74
75 # Streudiagramme
76 plot(dat)
77
78 panel.hist <- function(x, ...)
79 {
80     usr <- par("usr"); on.exit(par(usr))
81     par(usr = c(usr[1:2], 0, 1.5) )
82     h <- hist(x, plot = FALSE)
83     breaks <- h$breaks; nB <- length(breaks)
84     y <- h$counts; y <- y/max(y)
85     rect(breaks[-nB], 0, breaks[-1], y, col = "lightgrey", ...)
86 }
87
88 panel.cor <- function(x, y, digits = 2, prefix = "", cex.cor, ...)
89 {
90     usr <- par("usr"); on.exit(par(usr))
91     par(usr = c(0, 1, 0, 1))
92     r <- abs(cor(x, y, use="complete.obs"))
93     txt <- format(c(r, 0.123456789), digits = digits)[1]
94     txt <- paste0(prefix, txt)
95     if(missing(cex.cor)) cex.cor <- 0.8/strwidth(txt)
96     text(0.5, 0.5, txt, cex = cex.cor * r)
97 }
98
99 pairs(dat, lower.panel=panel.smooth, upper.panel=panel.cor, diag.panel=panel.hist)
100
101
102 #####
103
104 ## Vergleich verschiedener Variablen zwischen Fichten- und Laerchenwald
105
106 # Boxplot
107 plot(Deckung ~ Wald, data=dat)
108 plot(Hoehe ~ Wald, data=dat)
109 plot(Masse ~ Wald, data=dat)
110 plot(Streu ~ Wald, data=dat)
111 plot(GLI ~ Wald, data=dat)
112 # plot(Wurzel ~ Wald, data=dat) # kein Boxplot, weil Faktoren, nicht numerisch
113 # plot(WSpK ~ Wald, data=dat) # kein Boxplot, weil zu wenig Daten
114
115 plot(Verjuengung ~ Deckung, data=dat)
116 plot(Verjuengung ~ Hoehe, data=dat)
117 plot(Verjuengung ~ Masse, data=dat)
118 plot(Verjuengung ~ Streu, data=dat)
119 plot(Verjuengung ~ Wurzel, data=dat)

```

```

120 plot(Verjuengung ~ GLI, data=dat)
121
122
123 ## Tests
124
125 ## Nicht-parametrischer Wilcoxon Rangsummentest (Vergleich zwischen 2 Gruppen)
126 ## (falls Daten normalverteilt: t Test)
127 wilcox.test(dat[dat$Wald=="Fichte", "Deckung"], dat[dat$Wald=="Larche", "Deckung"])
128 wilcox.test(dat[dat$Wald=="Fichte", "DeckungMoos"], dat[dat$Wald=="Larche", "DeckungMoos"])
129 wilcox.test(dat[dat$Wald=="Fichte", "Hoehe"], dat[dat$Wald=="Larche", "Hoehe"])
130 wilcox.test(dat[dat$Wald=="Fichte", "Masse"], dat[dat$Wald=="Larche", "Masse"])
131 wilcox.test(dat[dat$Wald=="Fichte", "MasseMoos"], dat[dat$Wald=="Larche", "MasseMoos"])
132 wilcox.test(dat[dat$Wald=="Fichte", "Streu"], dat[dat$Wald=="Larche", "Streu"])
133
134 #Daten Licht ganzes Jahr
135 wilcox.test(tmp[tmp$Wald=="Fichte", "Bneff.mean"], tmp[tmp$Wald=="Larche", "Bneff.mean"])
136 wilcox.test(tmp2[tmp2$Wald=="Fichte", "Dneff.mean"], tmp2[tmp2$Wald=="Larche", "Dneff.mean"])
137 wilcox.test(tmp3[tmp3$Wald=="Fichte", "tB.mean"], tmp3[tmp3$Wald=="Larche", "tB.mean"])
138
139 #Daten Licht Vegperiode
140 wilcox.test(vegperiode[vegperiode$Wald=="Fichte", "Bneff.mean"], vegperiode[vegperiode$Wald=="Larche", "
    Bneff.mean"])
141 wilcox.test(vegperiode2[vegperiode2$Wald=="Fichte", "Dneff.mean"], vegperiode2[vegperiode2$Wald=="Larche", "
    Dneff.mean"])
142 wilcox.test(vegperiode3[vegperiode3$Wald=="Fichte", "tB.mean"], vegperiode3[vegperiode3$Wald=="Larche", "tB.
    mean"])
143 wilcox.test(Summe[Summe$Wald=="Fichte", "GLI"], Summe[Summe$Wald=="Larche", "GLI"])
144
145 # Chiquadrat Test (fuer Zaehldaten)
146 Root <- rbind(table(dat[dat$Wald=="Fichte", "Wurzel"], table(dat[dat$Wald=="Larche", "Wurzel"]))
147
148 chisq.test(Root)
149
150
151 #####
152
153 ## Vergleich verschiedener Variablen zwischen Plots pro Wald
154
155 # Plots
156 par(mfrow=c(1,2)) # zwei Grafiken in ein Fenster
157 plot(Deckung ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
158 plot(Deckung ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
159
160 plot(DeckungMoos ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
161 plot(DeckungMoos ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
162
163 plot(Hoehe ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
164 plot(Hoehe ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
165
166 plot(Masse ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
167 plot(Masse ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
168
169 plot(MasseMoos ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
170 plot(MasseMoos ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
171
172 plot(Streu ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
173 plot(Streu ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
174
175 plot(Wurzel ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
176 plot(Wurzel ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
177
178 plot(GLI ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
179 plot(GLI ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
180
181 plot(GLI ~ Plot, data=Summe[Summe$Wald=="Fichte",])
182 plot(GLI ~ Plot, data=Summe[Summe$Wald=="Larche",])
183
184 plot(Dneff ~ Plot, data=Licht[Licht$Wald=="Fichte",])

```

```

185 plot(Dneff ~ Plot, data=Licht[Licht$Wald=="Larche",])
186
187 plot(Bneff ~ Plot, data=Licht[Licht$Wald=="Fichte",])
188 plot(Bneff ~ Plot, data=Licht[Licht$Wald=="Larche",])
189
190 plot(tB ~ Plot, data=Licht[Licht$Wald=="Fichte",])
191 plot(tB ~ Plot, data=Licht[Licht$Wald=="Larche",])
192
193 ## Tests
194
195 ## Nicht-parametrischer Kruskal-Wallis Rangsummentest (Vergleich zwischen mehr als 2 Gruppen)
196 ## Kruskal-Wallis Test (Gibt es zwischen mindestens 2 Gruppen einen signifikanten Unterschied?):
197 ## (falls Daten normalverteilt: ANOVA)
198
199 kruskal.test(Deckung ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
200 kruskal.test(Deckung ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
201
202 kruskal.test(DeckungMoos ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
203 kruskal.test(DeckungMoos ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
204
205 kruskal.test(Hoehe ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
206 kruskal.test(Hoehe ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
207
208 kruskal.test(Masse ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
209 kruskal.test(Masse ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
210
211 kruskal.test(MasseMoos ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
212 kruskal.test(MasseMoos ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
213
214 kruskal.test(Streu ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
215 kruskal.test(Streu ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
216
217 kruskal.test(GLI ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",])
218 kruskal.test(GLI ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",])
219
220 # Daten Licht Mittelwert uebers Jahr
221 kruskal.test(Dneff.mean ~ Plot, data=tmp2[tmp2$Wald=="Fichte",])
222 kruskal.test(Dneff.mean ~ Plot, data=tmp2[tmp2$Wald=="Larche",])
223
224 kruskal.test(Bneff.mean ~ Plot, data=tmp[tmp$Wald=="Fichte",])
225 kruskal.test(Bneff.mean ~ Plot, data=tmp[tmp$Wald=="Larche",])
226
227 kruskal.test(tB.mean ~ Plot, data=tmp3[tmp3$Wald=="Fichte",])
228 kruskal.test(tB.mean ~ Plot, data=tmp3[tmp3$Wald=="Larche",])
229
230 # Daten Licht Mittelwert schneefreie Zeit
231 kruskal.test(GLI ~ Plot, data=Summe[Summe$Wald=="Fichte",])
232 kruskal.test(GLI ~ Plot, data=Summe[Summe$Wald=="Larche",])
233
234 kruskal.test(Dneff.mean ~ Plot, data=vegperiode2[vegperiode2$Wald=="Fichte",])
235 kruskal.test(Dneff.mean ~ Plot, data=vegperiode2[vegperiode2$Wald=="Larche",])
236
237 kruskal.test(Bneff.mean ~ Plot, data=vegperiode[vegperiode$Wald=="Fichte",])
238 kruskal.test(Bneff.mean ~ Plot, data=vegperiode[vegperiode$Wald=="Larche",])
239
240 kruskal.test(tB.mean ~ Plot, data=vegperiode3[vegperiode3$Wald=="Fichte",])
241 kruskal.test(tB.mean ~ Plot, data=vegperiode3[vegperiode3$Wald=="Larche",])
242
243
244 ## Chiquadrat Test (fuer Zaehldaten; Monte-Carlo Simulation fuer Schaetzung des P Wertes)
245
246 Root <- table(dat[dat$Wald=="Fichte",c("Plot","Wurzel")])
247 chisq.test(Root, simulate.p.value=TRUE,B=10000)
248
249 Root <- table(dat[dat$Wald=="Larche",c("Plot","Wurzel")])
250 chisq.test(Root, simulate.p.value=TRUE,B=10000)
251
252

```

```

253 ## Multipler Test nach Kruskal-Wallis Test
254 ## (Zwischen welchen Gruppen gibt es einen signifikanten Unterschied bei Signifikanzniveau 5% ?)
255 library(pgirmess) #Package pgirmess laden
256
257 kruskalmc(Streu ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Larche",], probs=0.05)
258
259 kruskalmc(Streu ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",], probs=0.05)
260
261 kruskalmc(MasseMoos ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",], probs=0.05)
262
263 kruskalmc(DeckungMoos ~ Plot, data=dat[dat$Wald=="Fichte",], probs=0.05)
264 #Mittelwert uebers Jahr
265 kruskalmc(Bneff.mean ~ Plot, data=vegperiode[vegperiode$Wald=="Fichte",], probs=0.05)
266 #Mittelwert ueber schneefreie Zeit
267 kruskalmc(Bneff.mean ~ Plot, data=vegperiode[vegperiode$Wald=="Larche",], probs=0.05)
268
269 kruskalmc(Bneff.mean ~ Plot, data=tmp[tmp$Wald=="Fichte",], probs=0.05)
270
271
272
273 #####
274 ## Modelle
275 #####
276 # Generalized linear-mixed effects model (binomial distribution)
277 # (Zielvariable: Verjuengung; random effect: Luecke)
278
279 # Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass Verjuengung vorhanden ist
280 levels(dat$Verjuengung)
281
282 library(lme4) # Package lme4 laden
283
284 # Full model (enthaelt alle Variablen)
285 modell1.glmer <- glmer(Verjuengung ~ Deckung + Hoehe + Masse + Streu + Wurzel + GLI + (1 | Luecke), data=
  dat, family=binomial)
286 summary(modell1.glmer)
287
288 modell2.glmer <- glmer(Verjuengung ~ DeckungMoos + Hoehe + MasseMoos +Streu + Wurzel +GLI + (1 | Luecke),
  data=dat, family=binomial)
289 summary(modell2.glmer)
290
291 # Modell mit 2 erklärenden Variablen
292 modell3.glmer <- glmer(Verjuengung ~ Streu + GLI + (1 | Luecke), data=dat, family=binomial)
293 summary(modell3.glmer)
294
295 # Modell mit 3 erklärenden Variablen
296 modell4.glmer <- glmer(Verjuengung ~ Deckung + Streu + GLI + (1 | Luecke), data=dat, family=binomial)
297 summary(modell4.glmer)
298
299 modell5.glmer <- glmer(Verjuengung ~ DeckungMoos + Streu + GLI + (1 | Luecke), data=dat, family=binomial)
300 summary(modell5.glmer)
301
302 modell6.glmer <- glmer(Verjuengung ~ Masse + Streu + GLI + (1 | Luecke), data=dat, family=binomial)
303 summary(modell6.glmer)
304
305 modell7.glmer <- glmer(Verjuengung ~ MasseMoos + Streu + GLI + (1 | Luecke), data=dat, family=binomial)
306 summary(modell7.glmer)
307
308
309 # Diagnostik Plots
310 plot(modell1.glmer)
311
312 qqnorm(resid(modell1.glmer))
313 qqline(resid(modell1.glmer))

```

8.3 Tabellen

Tabelle 8.1: Durchschnittlicher Nährstoffgehalt aller Horizonte pro Messstelle, alle Angaben sind in mmol/kg.

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Pb	Zn
Messstelle 1_1	25.52	39.67	0.65	1.30	15.27	0.60	< NG	< NG	< NG
Messstelle 2_1	14.04	40.57	0.71	3.01	14.23	0.50	< NG	< NG	< NG
Messstelle 3_5	20.95	28.69	1.00	0.99	8.82	0.47	< NG	< NG	< NG
Messstelle 4_5	28.22	13.97	1.53	0.86	4.60	< NG	< NG	0.02	< NG
Messstelle 5_5	0.25	96.53	0.059	1.12	19.11	1.33	< NG	< NG	< NG
Messstelle 14_1	38.91	202.79	1.14	6.97	19.31	15.91	< NG	< NG	< NG
Messstelle 14_5	20.34	82.36	0.34	4.91	13.94	20.04	< NG	< NG	< NG

Tabelle 8.2: Durchschnittliche Basensättigung (BS), organischer Kohlenstoffgehalt (C_org) und Kationenaustauschkapazität (KAK) aller Horizonte und der Durchschnitt der obersten 20 cm des Bodens.

	BS[%]	BS[%] bis 20cm	C_org	C_org bis 20cm	KAK	KAK bis 20cm
Messstelle 1_1	47.51	73.75	1.89	3.17	87.42	126.69
Messstelle 2_1	52.97	68.09	2.38	2.87	77.41	101.63
Messstelle 3_5	24.15	52.05	2.14	2.54	30.45	75.89
Messstelle 4_5	27.09	31.93	1.57	1.57	55.39	62.39
Messstelle 5_5	96.79	96.42	2.63	3.50	120.89	130.57
Messstelle 14_1	43.76	43.76	13.93	13.93	301.82	301.82
Messstelle 14_5	31.47	39.94	8.12	8.12	145.96	182.62

Tabelle 8.3: Nährstoffgehalt im Boden bei den sieben Messstellen, alle Angaben sind in mmol/kg.

		Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Pb	Zn
Messstelle 1_1										
Ah	0-4 cm	0.26	119.81	<NG	3.08	36.84	2.15	<NG	<NG	<NG
(A)Cv	4-30 cm	35.58	28.01	0.67	0.69	16.11	0.17	< NG	0.02	< NG
BC1	30-50 cm	37.68	5.93	0.64	0.68	4.53	0.04	< NG	< NG	< NG
BC2	>50 cm	28.57	4.92	0.63	0.75	3.60	0.05	< NG	< NG	< NG
Messstelle 2_1										
Ahh	0-3 cm	0.37	137.67	0.09	10.13	42.86	1.60	< NG	< NG	0.03
A(h)	3-7 cm	0.26	73.69	0.09	4.05	22.46	0.66	< NG	< NG	< NG
(A)B	7-14 cm	20.50	18.68	1.48	1.10	10.23	0.22	< NG	< NG	< NG
BC	14-35 cm	27.32	7.10	1.26	0.88	5.12	0.02	< NG	< NG	< NG
BC	35-70 cm	21.33	3.14	0.96	1.13	2.28	< NG	< NG	0.03	< NG
Cv	>70 cm	14.43	3.16	0.38	0.75	2.44	0.02	< NG	< NG	< NG
Messstelle 3_5										
Ah	0-4 cm	2.02	88.21	0.60	1.95	25.51	1.60	< NG	< NG	0.08
Cv1	4-40 cm	27.32	13.06	1.44	0.78	4.70	0.18	< NG	0.02	< NG
Cv2	40-60 cm	28.00	10.09	0.86	0.63	3.64	0.06	< NG	< NG	< NG
BCb	>60 cm	26.44	3.42	1.08	0.61	1.42	0.03	< NG	< NG	< NG
Messstelle 4_5										
Ah	0-4 cm	5.73	50.25	0.78	1.64	14.55	1.73	< NG	0.02	0.08
(A)Cv	4- cm	36.56	14.14	1.92	0.69	5.44	0.16	< NG	0.02	0.02
[BC]	-	39.94	3.48	2.57	0.65	1.50	0.02	< NG	0.02	< NG
Bb	-13 cm	37.73	1.42	1.76	0.60	0.66	< NG	< NG	0.02	< NG
Cv	43-63 cm	21.13	0.59	0.62	0.71	0.82	< NG	< NG	0.03	< NG
Messstelle 5_5										
Ah	0-4 cm	0.36	121.12	0.06	2.24	28.34	3.63	< NG	< NG	0.03
CAh	4-10 cm	0.35	100.91	< NG	0.87	17.25	1.13	0.20	< NG	< NG
AC1	10-30 cm	0.21	89.14	< NG	0.80	16.17	0.80	0.13	< NG	< NG
AC2	30-50 cm	0.19	80.78	< NG	0.82	17.53	0.64	< NG	< NG	< NG
(A)C	>50 cm	0.14	90.69	< NG	0.89	16.24	0.46	0.20	< NG	< NG
Messstelle 14_1										
(A)Cv	1-7 cm	75.02	32.30	2.30	1.02	6.51	2.09	< NG	0.05	0.08
RCv	>7 cm	40.83	5.01	0.96	0.52	1.69	0.09	< NG	< NG	< NG
Messstelle 14_5										
(A)Cv	2-8 cm	51.15	30.88	1.08	0.75	4.68	4.25	< NG	0.04	0.15
Cv	8-30 cm	58.96	5.04	0.84	0.49	0.86	0.05	< NG	< NG	< NG
C	>30 cm	27.06	1.67	0.37	< NG	0.51	0.05	< NG	< NG	< NG

Tabelle 8.4: Basensättigung (BS), austauschbare Protonen (H_exc), organischer Kohlenstoffgehalt (C_org), Kationenaustauschkapazität (KAK) und der pH-Wert im Boden bei den sieben Messstellen.

		BS	H_exc	C_org	KAK	pH
		[%]	[mmolc/kg]	[%]	[mmolc/kg]	
Messstelle 1_1						
Ah	0-4 cm	96.30	3.72	5.65	165.87	5.33
(A)Cv	4-30 cm	51.21	6.25	0.70	87.51	3.85
BC1	30-50 cm	20.65	4.45	0.60	53.94	3.87
BC2	>50 cm	21.89	3.83	0.62	42.34	3.98
Messstelle 2_1						
Ahh	0-3 cm	96.86	4.10	7.24	196.85	5.45
A(h)	3-7 cm	96.44	2.69	2.63	103.90	5.40
(A)B	7-14 cm	51.53	6.03	1.10	58.23	3.89
BC	14-35 cm	27.54	5.86	0.53	47.55	3.86
BC	35-70 cm	19.75	4.31	0.42	33.18	3.88
Cv	>70 cm	25.69	3.54	7.24	24.72	3.80
Messstelle 3_5						
Ah	0-4 cm	91.00	7.15	6.35	127.11	3.98
Cv1	4-40 cm	34.91	5.60	0.68	53.09	3.88
Cv2	40-60 cm	30.24	4.19	0.58	47.48	3.96
BCb	>60 cm	14.64	4.19	0.66	37.19	3.90
Messstelle 4_5						
Ah	0-4 cm	81.18	7.06	3.88	81.85	3.85
(A)Cv	4- cm	30.45	7.60	1.03	66.56	3.51
[BC]	-	10.32	6.46	0.72	54.64	3.66
Bb	-13 cm	5.76	4.32	0.64	46.51	3.74
Cv	43-63 cm	7.72	3.49	3.88	27.39	3.59
Messstelle 5_5						
Ah	0-4 cm	95.30	3.41	5.60	159.19	5.11
CAh	4-10 cm	96.78	2.489	2.73	123.20	5.05
AC1	10-30 cm	97.19	2.07	2.16	109.30	5.30
AC2	30-50 cm	97.10	2.15	1.30	102.11	5.58
(A)C	>50 cm	97.61	2.05	1.34	110.66	5.73
Messstelle 14_1						
(A)Cv	1-7 cm	28.27	21.53	0.41	140.90	3.15
RCv	>7 cm	12.34	9.38	2.30	58.48	3.22
Messstelle 14_5						
(A)Cv	2-8 cm	32.75	17.91	1.63	110.90	3.39
Cv	8-30 cm	8.17	12.01	0.39	78.26	3.08
C	>30 cm	6.05	6.32		35.97	

Tabelle 8.5: Korngrößenverteilung pro Horizont bei den zwölf Profilen.

Profile mit Messstellen					Profile in der gleichen Lücke wie links ohne Messstellen				
		Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]		Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	
Profil 1_1					Profil 1_5				
Ah	0-4 cm	66.55	22.4	11.05	Ah	0-3 cm			
(A)Cv	4-30 cm	60.8	31.2	8	B	3-17 cm	68.45	23.60	7.95
BC1	30-50 cm	70.45	23.05	6.5	BC	17-23 cm	61.30	28.20	10.50
BC2	>50 cm	72.05	23.15	4.8	C	>23 cm	65.85	26.45	7.70
Profil 2_1					Profil 2_5				
Ahh	0-3 cm	61.9	29.4	8.7	Ah	0-7 cm			
A(h)	3-7 cm	56.35	34.95	8.7	B(v)	7-37 cm	64.85	27.85	7.30
(A)B	7-14 cm	52.05	38.7	9.25	BC(v)	37-90 cm	59.20	33.25	7.55
BC	14-35 cm	60.85	30.7	8.45	R	>90 cm	62.80	31.10	6.10
BC	35-70 cm	72.45	21.1	6.45					
Cv	>70 cm	78.75	16.8	4.45					
Profil 3_5					Profil 3_1				
Ah	0-4 cm	69.8	23.45	6.75	Ah	0-2.5 cm	54.30	36.20	9.50
Cv1	4-40 cm	64.5	27.85	7.65	Ae	2.5-9 cm	62.50	28.75	8.75
Cv2	40-60 cm	65.25	27.55	7.2	Al	9-75 cm	69.65	23.60	6.75
BCb	>60 cm	71.25	22.1	6.65	R	>75 cm	69.30	25.10	5.60
Profil 4_5					Profil 4_1				
Ah	0-4 cm	68.55	25.2	6.25	Ah	0-4 cm	61.38	26.70	11.95
(A)Cv	4- cm	60.55	31.75	7.7	Ae	4-36 cm	67.20	26.25	6.55
[BC]	-	66.6	24.15	9.25	Bs	36-100 cm	55.95	39.20	4.85
Bb	-13 cm	70.55	21.85	7.6	BC	>100 cm	59.50	33.80	6.70
Cv	43-63 cm	65.05	27.35	7.6					
Profil 5_5					Profil 5_1				
Ah	0-4 cm	61.75	27.75	10.5	Ah	0-3 cm			
CAh	4-10 cm	66.15	23.05	10.8	Bh	3-30 cm	66.60	20.55	12.85
AC1	10-10 cm	70.75	21.5	7.75	BC	30-75 cm	72.95	21.30	5.75
AC2	30-50 cm	65.45	25.75	8.8	C	>75 cm	72.90	21.90	5.20
(A)C	>50 cm	68.75	23	8.25					
Profil 14_1									
(A)Cv	1-7 cm	46.35	38.75	14.9					
RCv	>7 cm	60.75	31.9	7.35					
Profil 14_5									
(A)Cv	2-8 cm	46	38.85	15.15					
Cv	8-30 cm	45.4	43.25	11.35					
C	>30 cm	58.5	33.1	8.4					

Tabelle 8.6: Lagerungsdichte, Porosität und Skelettgehalt des Bodens bei den sieben Messstellen.

		Lagerungsdichte [g/cm ³]	Porosität [%]	Skelettgehalt [%]
Profil 1_1, Messstelle 1_1				
Ah	0-4 cm	0.73	0.71	20.60
(A)Cv	4-30 cm	0.73	0.71	20.60
BC1	30-50 cm			
BC2	>50 cm	0.60	0.79	53.35
Profil 2_1, Messstelle 2_1				
Ahh	0-3 cm	0.92	0.64	16.17
A(h)	3-7 cm	0.92	0.64	16.17
(A)B	7-14 cm			
BC	14-35 cm			
BC	35-70 cm			
Cv	>70 cm	0.77	0.70	37.94
Profil 3_5, Messstelle 3_5				
Ah	0-4 cm	0.97	0.62	14.15
Cv1	4-40 cm	0.97	0.62	14.15
Cv2	40-60 cm			
BCb	>60 cm	2.32	0.34	42.98
Profil 4_5, Messstelle 4_5				
Ah	0-4 cm	0.97	0.61	11.83
(A)Cv	4- cm	0.97	0.61	11.83
[BC]	-			
Bb	-13 cm			
Cv	43-63 cm	1.37	0.49	10.73
R	>63 cm	1.37	0.49	10.73
Profil 5_5, Messstelle 5_5				
Ah	0-4 cm	0.63	0.74	16.27
CAh	4-10 cm	0.63	0.74	16.27
AC1	10-10 cm			
AC2	30-50 cm			
(A)C	>50 cm	0.92	0.71	60.44
Profil 14_1, Messstelle 14_1				
Ai	0-1 cm	0.84	0.70	32.77
(A)Cv	1-7 cm	0.84	0.70	32.77
RCv	7-35 cm	0.84	0.70	32.77
Profil 14_5, Messstelle 14_5				
Ai	0-2 cm	1.05	0.60	16.92
(A)Cv	2-8 cm	1.05	0.60	16.92
Cv	8-30 cm			
C	>30 cm	1.20	0.56	23.20

Tabelle 8.7: durchschnittlicher Global Light Index (GLI) und durchschnittliche Sonnenscheindauer pro Plot.

	GLI Lärchenwald	GLI Fichtenwald	Sonnenscheindauer Lärchenwald [min]	Sonnenscheindauer Fichtenwald [min]
Plot 1	0.092	0.077	229.48	131.84
Plot 2	0.092	0.067	263.33	129.41
Plot 3	0.082	0.055	248.4	127.40
Plot 4	0.071	0.040	222.83	102.31
Plot 5	0.058	0.029	204.33	81.91
	0.079	0.054	233.67	114.58

Tabelle 8.8: durchschnittliche direkte und indirekte Strahlung pro Plot.

	Direkte Strahlung [W/m ²] Lärchenwald	Direkte Strahlung [W/m ²] Fichtenwald	Indirekte Strahlung [W/m ²] Lärchenwald	Indirekte Strahlung [W/m ²] Fichtenwald
Plot 1	55.57	38.10	26.13	17.93
Plot 2	63.93	38.19	26.54	18.15
Plot 3	59.95	36.34	26.87	18.31
Plot 4	54.73	29.17	27.03	18.33
Plot 5	47.65	21.35	26.98	18.22
	56.37	32.63	26.71	18.19

Tabelle 8.9: Sonnenstrahlung bei den sieben Messstellen.

	GLI (Gap Light Index)	durchschnitt. Dauer Sonnenschein [min]	durchschnitt. direkte Strahlung [W/m ²]	durchschnitt. indirekte Strahlung [W/m ²]
Messstelle 1_1	0.056	224.93	55.49	27.15
Messstelle 2_1	0.091	254.78	52.32	21.98
Messstelle 3_5	0.070	113.37	29.05	21.73
Messstelle 4_5	0.057	220.30	47.69	27.06
Messstelle 5_5	0.159	143.27	38.05	23.79
Messstelle 14_1	0.069	185.20	51.91	16.75
Messstelle 14_5	0.046	143.30	34.36	18.98

Tabelle 8.10: Wasserspeicherkapazität (WSpK), sowie simulierte Trockenheitsindices und Anzahl Trockentage bei den zwölf Messstellen. Ab Trockenheitsindex > 0.4 ist die trockene Waldgrenze erreicht.

		oberste 20 cm des Bodens			ganzer Boden		
		WSpK	Trockenheitsindex	Anzahl trockener Tage	WSpK	Trockenheitsindex	Anzahl trockener Tage
Profil 1_1	Messstelle 1_1	21 mm	0.400	162	53 mm	0.135	89
Profil 1_5		38 mm	0.207	107	39 mm	0.201	106
Profil 2_1	Messstelle 2_1	38 mm	0.207	107	83 mm	0.056	55
Profil 2_5		42 mm	0.184	101	128 mm	0.009	23
Profil 3_1		36 mm	0.220	116	129 mm	0.008	22
Profil 3_5	Messstelle 3_5	42 mm	0.184	101	99 mm	0.033	42
Profil 4_1		45 mm	0.168	97	219 mm	0	0
Profil 4_5	Messstelle 4_5	36 mm	0.220	116	104 mm	0.027	38
Profil 5_1		30 mm	0.272	129	86 mm	0.051	52
Profil 5_5	Messstelle 5_5	25 mm	0.332	147	48 mm	0.154	94
Profil 14_1	Messstelle 14_1	14 mm	0.595	206	18 mm	0.470	183
Profil 14_5	Messstelle 14_5	29 mm	0.284	134	51 mm	0.144	91

Tabelle 8.11: Streuauflage und Bodenvegetation bei den sieben Messstellen.

	Streu [m]	Deckung [%]	Deckung mit Moos [%]	Biomasse [g]	Biomasse mit Moos [g]	Wurzeln
Messstelle 1_1	0.05	17.2	17.2	28.49	28.49	3
Messstelle 2_1	0.07	23.6	23.6	14.25	14.25	1
Messstelle 3_5	0.07	36.8	36.8	10.22	10.22	2
Messstelle 4_5	0.03	12.8	12.8	2.26	2.26	1
Messstelle 5_5	0.04	92.8	92.8	80.81	80.81	4
Messstelle 14_1	0	0	0	0	0	1
Messstelle 14_5	0.005	30.4	48.4	45.76	50.53	3

Tabelle 8.12: durchschnittliche Streuauflage und Durchwurzelungsintensität pro Plot.

	Streu Lärchenwald	Streu Fichtenwald	Wurzeln Lärchenwald	Wurzeln Fichtenwald
Plot 1	9.80 cm	3.20 cm	1.7	2.2
Plot 2	3.50 cm	0.40 cm	2.7	2.5
Plot 3	3.80 cm	0.20 cm	3.0	2.9
Plot 4	2.85 cm	0.45 cm	2.6	3.1
Plot 5	3.50 cm	0.15 cm	3.0	3.1
	4.69 cm	0.88 cm	2.6	2.8

Tabelle 8.13: durchschnittliche Biomasse der Bodenvegetation pro Plot.

	Biomasse Lärchenwald	Biomasse mit Moos Lärchenwald	Biomasse Fichtenwald	Biomasse mit Moos Fichtenwald
Plot 1	15.13 g	15.13 g	8.25 g	15.58 g
Plot 2	45.84 g	45.84 g	25.26 g	44.04 g
Plot 3	43.46 g	43.46 g	28.80 g	50.99 g
Plot 4	37.34 g	37.34 g	27.94 g	61.85 g
Plot 5	34.81 g	34.81 g	26.23 g	92.60 g
	47.36 g	47.36 g	23.27 g	53.01 g

Tabelle 8.14: durchschnittlicher Deckungsgrad der Bodenvegetation pro Plot.

	Deckungsgrad Lärchenwald	Deckungsgrad mit Moos Lärchenwald	Deckungsgrad Fichtenwald	Deckungsgrad mit Moos Fichtenwald
Plot 1	35.12 %	22.02 %	13.68 %	15.58 %
Plot 2	71.88 %	66.42 %	36.88 %	44.04 %
Plot 3	67.08 %	58.11 %	52.28 %	50.99 %
Plot 4	68.16 %	46.74 %	50.60 %	61.85 %
Plot 5	65.56 %	43.50 %	38.32 %	92.60 %
	61.56 %	47.36 %	38.35 %	53.01 %

Tabelle 8.15: Deckungsgrad für jeden Plot (Lärchenwald).

Lücke_ Plot	Deckung [%]	Biomasse [g]	Lücke_ Plot	Deckung [%]	Biomasse [g]	Lücke_ Plot	Deckung [%]	Biomasse [g]
1_1	17.2	28.49	4_3	4.8	4.32	7_5	98.4	52.91
1_2	99.6	90.73	4_4	1.6	0.38	8_1	0	0
1_3	76	31.22	4_5	12.8	2.26	8_2	58.8	34.85
1_4	96.4	49.58	5_1	94	90.56	8_3	67.2	28.64
1_5	55.6	23.6	5_2	94	94.29	8_4	47.2	14.3
2_1	23.6	14.25	5_3	100	105.9	8_5	100	63.62
2_2	38	14.71	5_4	100	74.98	9_1	16	6.91
2_3	26	15.68	5_5	92.8	80.81	9_2	95.6	89.71
2_4	25.2	12.07	6_1	100	27.42	9_3	95.2	112.13
2_5	9.6	13.79	6_2	98.8	69.07	9_4	73.2	63.34
3_1	44	18.93	6_3	59.2	74.76	9_5	82	59.72
3_2	34.8	13.1	6_4	92.4	82.09	10_1	5.2	5.26
3_3	45.6	14.55	6_5	94	51.28	10_2	99.2	212.19
3_4	52.4	15.8	7_1	50.8	28.24	10_3	100	163.23
3_5	36.8	10.22	7_2	92.4	43.51	10_4	93.2	89.51
4_1	0.4	0.14	7_3	96.8	30.76	10_5	73.6	76.74
4_2	7.6	2.06	7_4	100	65.39			

Tabelle 8.16: Deckungsgrad für jeden Plot (Fichtenwald).

Lücke_ Plot	Deckung [%]	Biomasse [g]	Deckung inkl Moos [%]	Biomasse inkl Moos [g]	Lücke_ Plot	Deckung [%]	Biomasse [g]	Deckung inkl Moos [%]	Biomasse inkl Moos [g]
11_1	18.8	12.91	18.8	12.91	16_1	31.6	13.93	31.6	13.93
11_2	25.2	8.58	50	33.97	16_2	100	65.5	100	65.5
11_3	29.6	8.8	90	97.53	16_3	100	44.56	100	44.56
11_4	59.6	25.33	59.6	72.05	16_4	92.8	47.7	92.8	47.7
11_5	48	24.71	48	66.97	16_5	84.8	29.83	96.4	29.83
12_1	23.2	12.21	23.2	12.21	17_1	16.8	6.25	16.8	6.25
12_2	51.2	38.97	52	41.1	17_2	48.4	33.04	52.8	33.04
12_3	54.4	19.28	73.2	106.15	17_3	93.2	44.87	94.8	52.6
12_4	26	20.4	83.2	84.94	17_4	97.6	39.15	97.6	39.15
12_5	26.4	9.92	80	101.83	17_5	98	67.98	98	67.98
13_1	6	3.87	6	3.87	18_1	0.4	0	59.6	60.46
13_2	31.6	23.58	74.4	92.72	18_2	2.4	1.98	17.2	33.18
13_3	80.4	34	96	65.01	18_3	0	7.56	36	7.56
13_4	60	22.72	100	89.32	18_4	4.8	3	62	66.16
13_5	9.6	2.24	85.6	144.25	18_5	6.4	1.43	100	247.97
14_1	0	0	0	0	19_1	16	7.32	16	7.32
14_2	0	0	0	0	19_2	7.6	1.48	39.2	54
14_3	43.6	37.1	43.6	37.1	19_3	2	1.04	2.4	2.78
14_4	100	78.73	100	78.73	19_4	22.8	11.66	35.2	66.72
14_5	30.4	45.76	48.4	50.53	19_5	19.2	11.44	61.6	76.73
15_1	2.8	8.18	48.8	21	20_1	21.2	17.82	21.2	17.82
15_2	6	4.16	24.4	6.39	20_2	96.4	75.27	96.4	80.47
15_3	19.6	18.18	19.6	18.18	20_3	100	72.56	100	78.47
15_4	17.2	10.69	60.8	10.69	20_4	25.2	20.01	41.6	62.99
15_5	27.2	34.67	27.2	104.53	20_5	33.2	33.23	35.2	35.39