

Temperaturlogger auf der Brandfläche Il Fuorn im Schweizerischen Nationalpark

Timothy Thrippleton, 2017



(Fotos: Lukas Barth, Teresa Steinert, 2015)

Projektbericht

Schweizerischer Nationalpark, Zernez, 2017

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzzusammenfassung.....	3
2. Einleitung	5
3. Material und Methoden	7
3.1 Beschreibung der Brandfläche	7
3.2 Installation der Temperaturlogger	7
4. Resultate	11
4.1 Vergleich Brandfläche – Wald	11
4.1.1 Mittelwerte	12
4.1.2 Tagesspanne	13
4.1.3 Extremwerte	14
4.1.4 Unterschiede im Tagesverlauf.....	14
4.2 Unterschiede entlang des Höhengradienten	16
4.3 Vergleich Temperaturbedingungen mit anderen Standorten.....	17
4.3.1 Allgemeiner Vergleich	17
4.3.2 Vergleich Il Fuorn - Stabelchod	18
5. Diskussion	19
5.1 Temperaturunterschiede Brandfläche – Wald.....	19
5.2 Unterschiede entlang des Höhengradienten	20
5.3 Vergleich zu Klimastationen Stabelchod und Buffalora	21
5.4 Bedeutung für die Vegetationsentwicklung	22
6. Schlussfolgerung	24
Danksagung	25
Literaturliste	25
Appendix:	28
A1 - Vergleich Temperaturlogger USB und iButton.....	28
A2 - Vergleich monatliche Temperaturen auf Brandfläche und Wald bei Il Fuorn.....	29
A3 - Temperatur Tagesspanne (Diurnal Range).....	32
A4 - Temperaturunterschiede Höhenlagen (monatliche Auflösung)	33
A5 - Strahlungsdaten	34
A6 - Relative Luftfeuchtigkeit	36

1. Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden die Temperaturbedingungen auf der Brandfläche von Il Fuorn im Schweizerischen Nationalpark untersucht, welche seit mehr als 50 Jahren durch eine ausserordentlich langsame Sukzession und ein Ausbleiben der Wiederbewaldung gekennzeichnet ist. Hierzu wurden 18 Temperaturlogger entlang eines Höhengradienten (1840 bis 2240 m ü.M. in 50 m Höhenabständen) auf der Brandfläche und im angrenzenden Wald ausgebracht. Zudem wurden die Daten mit den Temperaturmesswerten von nahe gelegenen Klimastationen verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Brandfläche im Vergleich zum angrenzenden Wald durch folgende Eigenschaften unterscheidet:

- (1) Die Temperatur lag im Jahresmittel um 0.25 °C höher.
- (2) Die Tagesspanne der Temperatur war im Jahresmittel um 1.8°C grösser.
- (3) Es traten im Jahresverlauf bis zu +20°C wärmere bzw. -10°C kältere Temperaturextreme auf.
- (4) Die Brandfläche erwärmte sich im Verlauf des Vormittages schneller und erreichte mittags tendenziell höhere Temperaturen. Abends näherten sich die Temperaturverläufe wieder an.
- (5) Grösste Temperaturunterschiede traten in niedrigeren Lagen auf (1840-1940 m ü.M.).

Der Unterschied zwischen Wald und Offenland war für die Brandfläche bei Il Fuorn sowohl für Mitteltemperaturen als auch für Tagestemperaturspannen deutlich stärker ausgeprägt als bei Stabelchod.

Die ökologische Bewertung der Daten legt nahe, dass die Vegetation (insbesondere die Baumverjüngung) auf der Brandfläche eher von temperaturbedingtem Trockenstress und erhöhter Photoinhibition bei niedrigen Temperaturen, als durch direkte Schäden aufgrund von extremen Temperaturen betroffen sein dürfte. Diese Effekte können zu einer Erniedrigung der Resilienz der Vegetation gegenüber Störungen, wie Wildverbiss oder Abrasion durch Geröll und Schneebewegung, führen.

Abstract

In this study, the temperature conditions at a wildfire site near Il Fuorn in the Swiss National Park were investigated. The area is characterized by an extremely slow succession and an almost entire absence of tree regeneration for more than 50 years. For this purpose, 18 temperature loggers were installed at the wildfire site and the adjacent forest along an elevational gradient (1840 to 2240 m a.s.l. in 50 m elevation steps). Furthermore, the obtained data was compared to temperature measurements from nearby climate stations. The results show that the wildfire site is characterized by:

- (1) a higher mean annual temperature (0.25 °C) compared to the forest
- (2) A higher diurnal temperature range (annual average of 1.8 °C)
- (3) More extreme minimum and maximum temperatures (up to -10 and +20 °C, respectively) occurring throughout the year
- (4) A tendency to faster warming in the morning and higher temperatures during noon and early afternoon compared to the forest. However, differences in evening and night time temperatures were relatively small.
- (5) The highest temperature differences between the wildfire site and the forest occurred at lowest elevations (1840 – 1940 m. a.s.l.).

A comparison with the climate stations at Stabelchod (open field and forest) located nearby showed that the wildfire site at Il Fuorn was characterized by higher mean temperatures and a higher diurnal range.

An ecological evaluation of the results implies that the vegetation (in particular tree regeneration) at the wildfire site is more likely constrained by temperature-induced drought stress and low temperature photoinhibition than by direct damage due to extreme temperatures. These effects can reduce the resilience of the vegetation and thus its capacity to cope with additional disturbances, such as ungulate browsing and damage by rockfall or avalanches.

2. Einleitung

Die Waldbrandfläche bei Il Fuorn im Schweizerischen Nationalpark ist für die Erforschung der Sukzession nach Störungsereignissen von besonderer Bedeutung (Geissler und Hartmann, 2000). Seit einem Lawinnenniedergang und einem darauffolgenden Brand im Jahre 1951 befindet sich die Vegetationsentwicklung seit über 50 Jahren immer noch in einem frühen Pionierstadium ohne Anzeichen einer Wiederbewaldung (Geissler und Hartmann, 2000, Scheurer und Hartmann, 2013). Im Zuge des Brandereignisses wurden das Fallholz aus dem Lawinnenniedergang sowie der grösste Teil des überlebenden Bergföhrenwaldes (*Pinus mugo*) verbrannt. Zudem verbrannte das Störungsereignis die Bodenvegetation und die Humusaufgabe teilweise vollständig (Geissler und Hartmann, 2000; Wild und Zsak, 2012). Die hierdurch entstandenen Umweltbedingungen sowie der Einfluss äsender Huftiere machen die Brandfläche bei Il Fuorn zu einem wissenschaftlich besonders interessanten Fall extrem langsamer Sukzession. Das kontinuierliche Monitoring der Brandfläche seit dem Störungsereignis durch den Schweizerischen Nationalpark stellt zudem einen umfassenden Datensatz dar, der einen aussergewöhnlich langen Zeitraum abdeckt. Dies ermöglicht es, die Vegetationsdynamik über Zeiträume zu erforschen, die den Zeithorizont sonstiger Forschungsprojekte bei weitem übersteigen.

Während der Einfluss des Wildverbisses auf die Vegetationsentwicklung im Gebiet des Nationalparks bereits in einer Reihe von Forschungsprojekten untersucht wurde (z.B., Schütz et al., 2000; Wild und Zsak, 2012) ist bisher noch relativ wenig über die landschaftsspezifischen Temperaturbedingungen und ihren Einfluss auf die Vegetationsdynamik im Parkgebiet bekannt. Extreme Temperaturbedingungen können insbesondere für Bäume zu hoher Mortalität im Verjüngungsstadium führen (Binder und Fielder, 1995) und in Kombination mit hoher Einstrahlung die Wiederbewaldung zum Teil gänzlich unterbinden (Bader et al., 2007).

Aufgrund der Lage der Brandfläche an einem exponierten Südhang nahe der Waldgrenze ist zu erwarten, dass hier besonders extreme Temperaturbedingungen auftreten. Durch die Exposition des steilen Südhangs kann die Sonneneinstrahlung an klaren Tagen sehr hohe Werte erreichen, und in Abwesenheit eines schützenden Kronraumes und einer dämpfenden Humusschicht zu erheblicher Temperaturerhöhung führen (Zou et al., 2007; Baldocchi et al., 2000). Zudem ist zu erwarten, dass in Abwesenheit dämpfender Faktoren die nächtliche langwellige Ausstrahlung höher ist (Foken, 2006) und damit auf der Fläche niedrigere Nachttemperaturen als im benachbarten Wald auftreten.

Da sich die Brandfläche über einen Höhengradienten von 320 m erstreckt (1820 bis 2140 m ü.M.), können zusätzliche Temperaturunterschiede mit der Höhe auftreten. Typischerweise tritt im Mittel eine Temperaturabnahme (sog. 'Lapse rate') von 0.65°C pro 100 m Höhe auf (Whiteman, 2000), wodurch ein Temperaturunterschied von ca. 2°C zwischen oberem und unterem Bereich der Brandfläche zu erwarten wäre. Neben diesem adiabatischen Temperaturgradienten können jedoch weitere mikrometeorologische Effekte (z.B. Kaltluftabfluss, etc.) Einfluss auf den Temperaturgradienten haben.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die Temperaturbedingungen auf der Brandfläche im Jahresverlauf und entlang des gesamten Höhengradienten zu untersuchen und mit den Bedingungen im angrenzenden Wald zu vergleichen. Zudem sollen diese Ergebnisse mit den Daten der nahe gelegenen Klimastationen bei Stabelchod (Wald und Offenland) und Buffalora verglichen werden. Zusammenfassend sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

1. Wie unterscheiden sich die Temperaturbedingungen zwischen Brandfläche und angrenzendem Wald? Welche Unterschiede ergeben sich für Mittelwerte, die Tagesspanne, sowie für Extremwerte?
2. Weisen verschiedene Höhenstufen unterschiedliche Muster auf? Ist auf der Brandfläche und im Wald ein adiabatischer Temperaturgradient (Abnahme der Temperatur mit der Höhe) zu beobachten?
3. Wie stark unterscheiden sich die Temperaturbedingungen auf der Waldbrandfläche von den nahe gelegenen Klimastationen Stabelchod und Buffalora? Sind die Temperaturdifferenzen zwischen Brandfläche und Wald bei Il Fuorn vergleichbar mit den Unterschieden zwischen Offenland und Wald bei Stabelchod?

Der vorliegende Bericht zu den thermalen Bedingungen auf der Brandfläche soll zur Klärung der Frage beitragen, in welchem Ausmass Temperaturbedingungen auf der Brandfläche für die ausbleibende Wiederbewaldung verantwortlich sind.

3. Material und Methoden

3.1 Beschreibung der Brandfläche

Die Waldbrandfläche befindet sich an einem steilen, sonnenexponierten Südhang bei Il Fuorn im Schweizerischen Nationalpark (siehe Abb.1.) und erstreckt sich von 1840 m bis 2140 m ü.M., mit einer Breite von etwa 100 m (Geissler und Hartmann, 2000).

Das Klima im Nationalpark liegt innerhalb der kontinentalen, inneralpinen Trockenzone (Flury, 1988). Aufgrund der relativ niedrigen Bewölkung (Station Buffalora) ist das Gebiet von starker Sonneneinstrahlung und starken Schwankungen in der Lufttemperatur gekennzeichnet (Flury, 1988). Die mittlere Jahrestemperatur an der Klimastation Buffalora (1968 m ü.M.) liegt bei -0.1°C, mittlerer Jahresniederschlag bei 789 mm und die mittlere Dauer der Schneebedeckung bei 199.8 Tagen im Jahr (Normperiode 1961-1990, MeteoSwiss; <http://www.meteoswiss.admin.ch/>, Juli 2017).

Geologisch ist das Gebiet durch Ausgangsgestein von Kalkformationen, insbesondere von Dolomit, geprägt (Trümpy et al. 1997). Die Böden im Bereich der Brandfläche bei Il Fuorn sind zumeist flachgründige Karbonatgesteinsböden, in der näheren Umgebung herrschen zudem Rendzinen und Humus-Karbonatgesteinsböden vor (Zimmermann et al., 2013).

Die Vegetation im Fuorn-Tal ist durch das Vorherrschen der Bergföhre (*Pinus mugo*) geprägt; auf mehreren ehemaligen Alpweiden (z.B., Stabelchod) ist die Vegetation heute von subalpinen Hochstauden und Gräsern dominiert (Schütz et al., 2003). Auf der Brandfläche wurde bereits im Jahr 1951 eine Reihe an Dauerflächen installiert, die im Jahr 1988 um weitere Flächen ergänzt wurden (Geissler und Hartmann, 2000). Zudem wurden Einzäunungsexperimente durchgeführt, um den Einfluss von Wildverbiss auf die Verjüngung auf der Waldbrandfläche zu untersuchen. Eine detaillierte Zusammenfassung vegetationskundlicher Untersuchungen auf der Brandfläche findet sich in Geissler und Hartmann (2000). Ergebnisse der Huftierbeobachtungen auf der Brandfläche sind im Bericht von Wild und Zsak (2012) beschrieben.

3.2 Installation der Temperaturlogger

Am 26.10.2015 wurden 18 Temperaturlogger entlang zweier Höhentransekte (Brandfläche und Wald) in jeweils 50 m Höhendistanz installiert (Abb.1). Die Datenerhebung erfolgte über den gesamten Untersuchungszeitraum mit einer zeitlichen Auflösung von 30 min. und wurde bis zum 14.05.2017 durchgeführt.

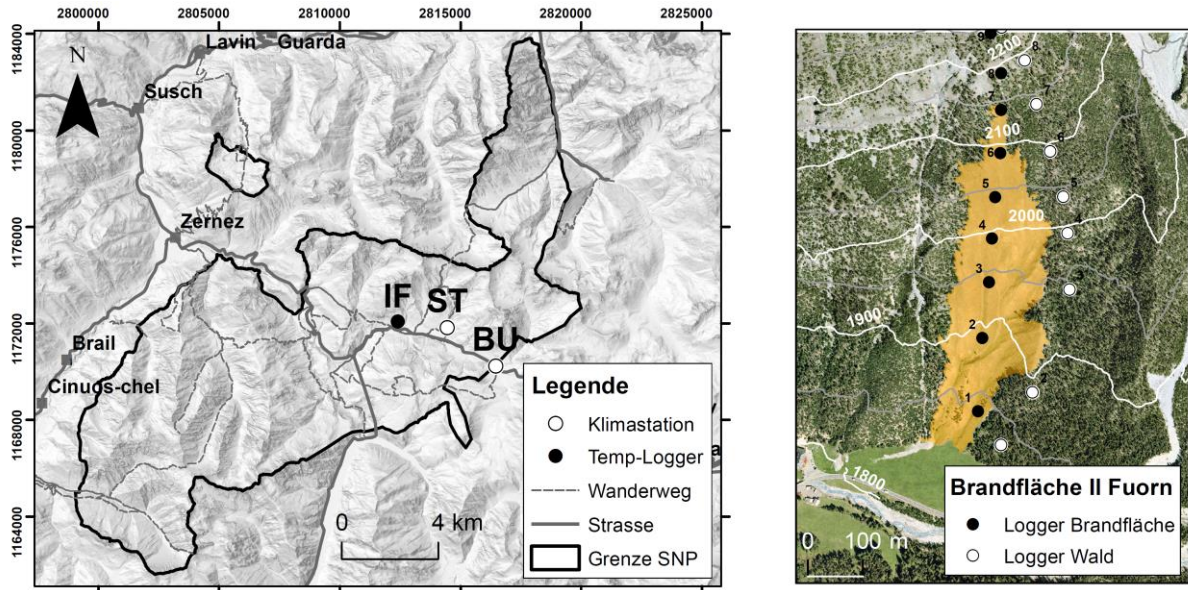


Abbildung 1 Lage der Brandfläche Il Fuorn (IF) und der Klimastationen Stabelchod (ST) und Buffalora (BU).

Für die Studie wurden zwei Typen an Temperatur-Loggern verwendet: (1) iButton-Logger (DS1922L, Maxim Integrated Corp., USA), für den Zeitraum vom 26.10.2015 bis 26.5.2016 und (2) USB Logger (USB-502-PLUS, Measurement Computing GmbH, Deutschland), welche vom 26.10.2015 (bzw. 26.05.2016) bis 14.05.2017 verwendet wurden (siehe Tabelle 1). Für die USB-502-PLUS Logger wurde neben der Temperatur auch die relative Luftfeuchte aufgenommen (Daten der rel. Luftfeuchte finden sich im Anhang, Appendix A6).

Die Verteilung der jeweiligen Temperaturlogger ist in Tabelle 1 aufgeführt. Auf Höhe 2090 und 2190 m ü.M. wurden beide Loggertypen am jeweils gleichen Ort installiert, um ihre Vergleichbarkeit zu überprüfen. Da die gemessenen Temperaturdaten beider Loggertypen nahezu identisch waren (siehe Appendix A1), wurde für die folgenden Analysen nicht mehr zwischen Loggertypen unterschieden.

03. Material und Methoden

Tabelle 1 Benennung, Positionen und Typus der Temperaturlogger. Anmerkung zu Logger_Typus: Standorte mit 'USB & iButton' wurden bereits vom 26.10.2015 an mit USB und iButton Loggern ausgestattet. Standorte mit 'iButton, USB' wurden am 26.10.2015 mit iButton Loggern ausgestattet, welche am 26.5.2016 durch USB Logger ersetzt wurden.

Logger Name	Fläche	Höhenlage	Logger_Typus	Koordinaten
TL01_BF_1840	Brandfläche	1840	USB	812396 / 171972
TL10_W_1840	Wald	1840	USB	812436 / 171910
TL02_BF_1890	Brandfläche	1890	iButton, USB	812403 / 172099
TL11_W_1890	Wald	1890	iButton, USB	812490 / 171998
TL03_BF_1940	Brandfläche	1940	USB	812415 / 172192
TL12_W_1940	Wald	1940	USB	812542 / 172179
TL04_BF_1990	Brandfläche	1990	iButton, USB	812413.7 / 172267.3
TL13_W_1990	Wald	1990	iButton, USB	812546 / 172265
TL05_BF_2040	Brandfläche	2040	USB	812415.6 / 172332.9
TL14_W_2040	Wald	2040	USB	812552 / 172337
TL06_BF_2090	Brandfläche	2090	USB & iButton	812419.2 / 172415.5
TL15_W_2090	Wald	2090	USB & iButton	812526 / 172416
TL07_BF_2140	Brandfläche	2140	USB	812427.5 / 172515.3
TL16_W_2140	Wald	2140	USB	812474 / 172528
TL08_BF_2190	Brandfläche	2190	USB& iButton	812431.3 / 172578.9
TL17_W_2190	Wald	2190	USB& iButton	812472.1 / 172598.9
TL09_BF_2240	Brandfläche	2240	USB	812417.2 / 172650.4
TL18_W_2240	Wald	2240	USB	812436 / 172657

Die Temperaturlogger wurden auf ca. 1 m Höhe über dem Boden in Holzpflocken (Abb.2) eingebaut. Für die Installation der Logger wurden die Holzpflocke an der Oberseite eingepflockt, und der entstandene Hohlraum nach Einsetzen des Loggers mit einem Holzdeckel verschlossen (siehe Abb.2). Um einen verbesserten Austausch mit der Umgebungsluft zu gewährleisten, wurden alle Holzpflocke mit einem Belüftungsloch versehen, das gleichzeitig das Abfließen von eindringendem Regenwasser ermöglichte. Es wurde darauf geachtet, dass alle Pflocke aus dem gleichen, hellen Holz bestanden, um mögliche Strahlungseffekte zu minimieren. Der Einfluss der Messapparatur wurde zudem in einem Vorversuch genauer getestet (Haller, 2015).



Abbildung 2 Messanordnung der Temperaturlogger bei Il Fuorn (Fotos: Lukas Barth und Teresa Steinert, 2015)

Die Daten der Temperaturlogger bei Il Fuorn wurden mit Temperaturdaten der beiden Klimastationen Stabelchod ('Offen/Field' und 'Wald/Forest'), sowie der Station Buffalora verglichen (siehe Abb.1).

Die Klimastation Stabelchod 'Offen/Field' befindet sich auf einer ehemaligen Alpweide mit einer Grösse von 11 ha, auf 1899 m ü.M. Die Weide besitzt eine relativ einheitliche Süd-Exposition mit einer Hangneigung von etwa 6° und ist mit dichtem Gras bewachsen (Schütz et al., 2003). Die Station 'Wald/Forest' befindet sich im angrenzenden Bergföhrenwald unter vergleichbaren topographischen Bedingungen auf einer Höhe von 1914 m ü.M. Beide Klimastationen werden seit 1997 von der WSL als Teil des LWF Monitoring Projektes betrieben.

Die Klimastation Buffalora befindet sich am Gasthaus Buffalora an der Ofenpassstrasse nahe der Parkgrenze auf 1968 m ü.M (siehe Abb.1).

Die Analysen und Darstellungen der Daten wurden in R, Version 3.3.1 (R Development Core Team, 2016) und ArcGIS Version 10.3.1 (ESRI inc., 2016) durchgeführt.

4. Resultate

4.1 Vergleich Brandfläche – Wald

Um den Vergleich zwischen Messungen der Temperaturlogger auf der Brandfläche und im angrenzenden Wald (Abb.3) übersichtlicher zu gestalten, wurden die Daten im Folgenden nach Jahreszeiten und für drei Höhenstufen ('LOW': 1840-1940; 'MID': 1990-2090; 'HIGH' 2140-2240) aggregiert. Detailliertere Ergebnisse mit monatlicher Auflösung befinden sich im Anhang, Appendix A3.

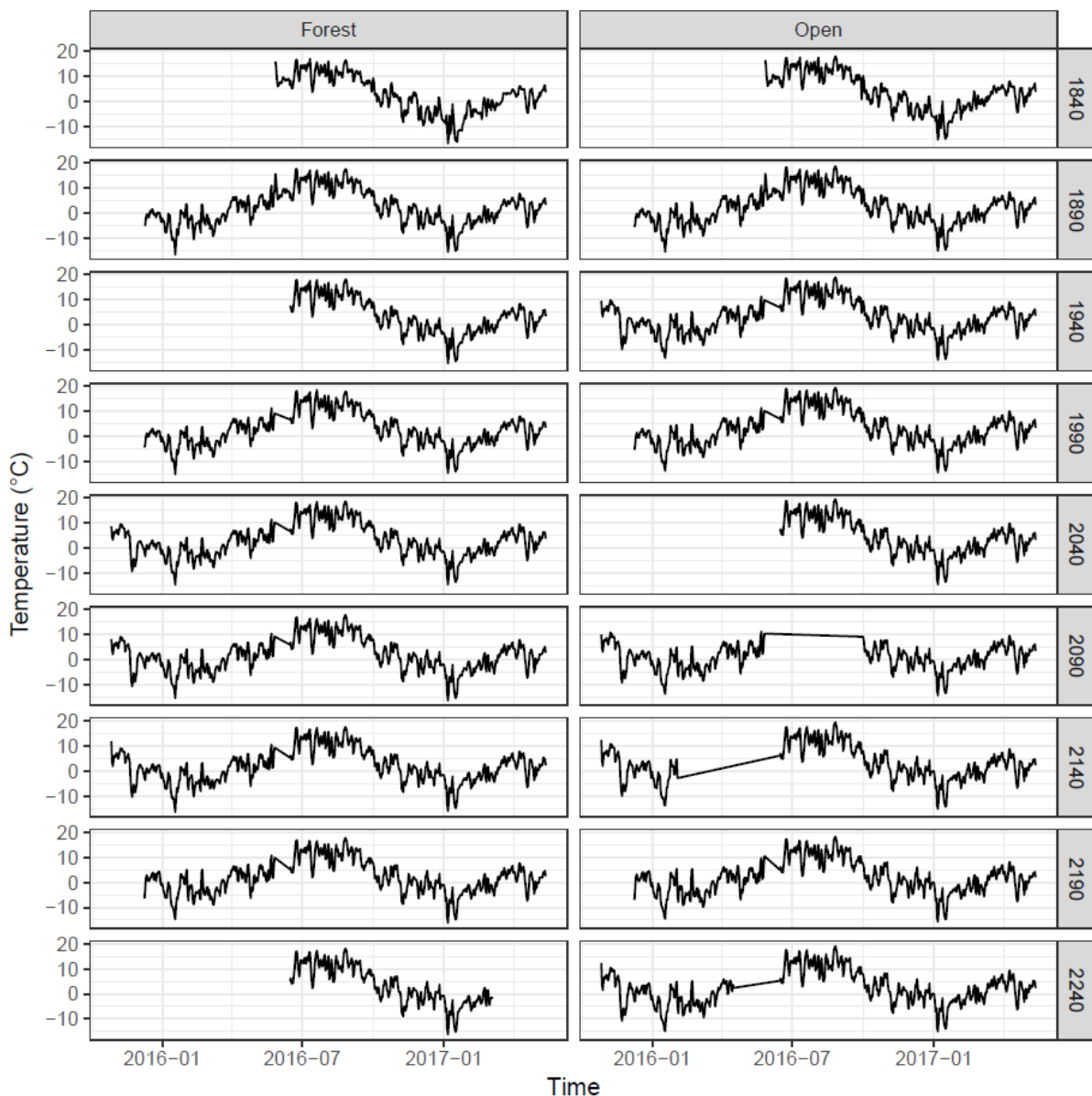


Abbildung 3 Tagesmitteltemperaturen für Brandfläche und Wald auf den jeweiligen Höhenstufen

4.1.1 Mittelwerte

Im Jahresmittel (Mittelwert über alle Monate) lagen die Temperaturen auf der Brandfläche um 0,25 °C höher als im benachbarten Wald. Jahreszeitliche Veränderungen der Temperaturunterschiede zwischen Brandfläche und Wald waren nur schwach ausgeprägt (Abb.4). Stärkste Unterschiede zwischen Brandfläche und Wald traten auf der niedrigen und mittleren Höhenlage auf (1,11°C im Winter), während sich die obersten Höhenlagen weniger als 0,8°C voneinander unterschieden. Für eine tabellarische Darstellung der Monatsmitteltemperaturen auf Brandfläche und Wald, siehe Appendix A2.

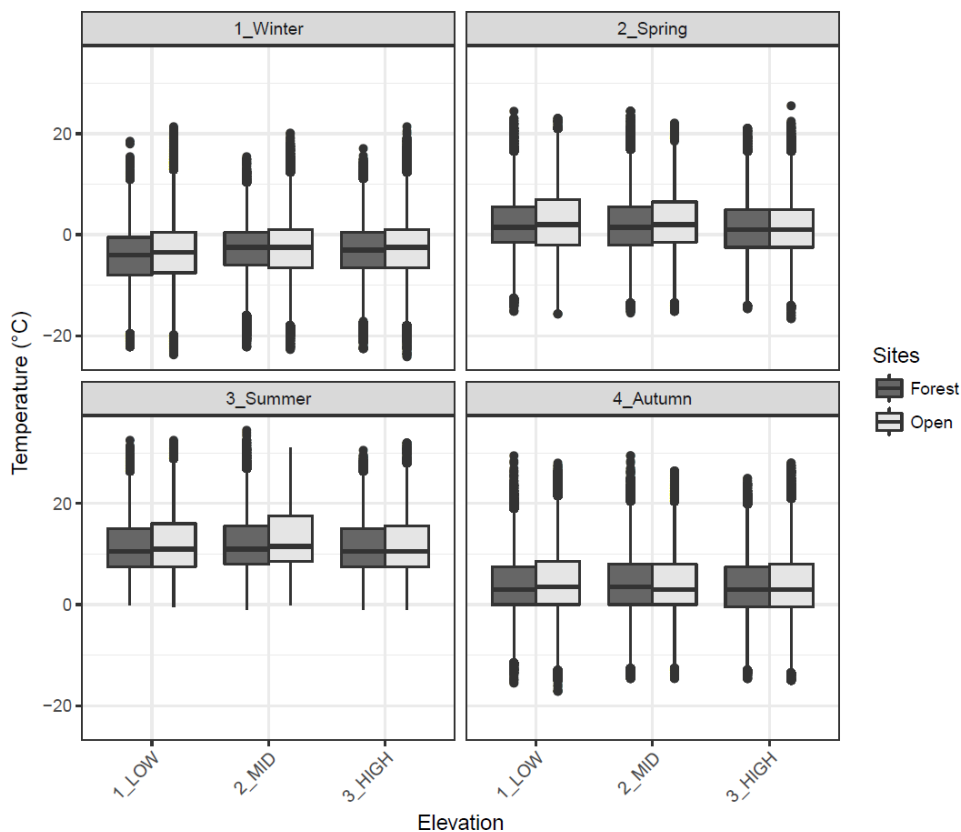


Abbildung 4 Temperaturbedingungen pro Jahreszeit und Höhenstufe ('LOW': 1840-1940; 'MID': 1990-2090; 'HIGH' 2140-2240) für Brandfläche und angrenzenden Wald bei Il Fuorn. Anmerkung: im Boxplot ist der Median als Lagemass dargestellt, während sich der Text auf den Mittelwert bezieht. Beide Lagemasse sind jedoch aufgrund der annähernden Normalverteilung der Daten praktisch identisch.

4.1.2 Tagesspanne

Die Tagesspanne der Temperatur (Differenz zwischen Temperaturmaximum und -minimum innerhalb des Tagesverlaufs, Abb.5) zeigte deutliche Unterschiede zwischen Brandfläche und angrenzendem Wald. Während die Temperaturspanne im Jahresmittel für den Wald bei 13.9°C lag, war diese auf der Brandfläche mit 15.7°C um 1.8°C höher. Stärkste Unterschiede in den Tagesspannen traten in den tieferen Lagen auf, welche besonders im Winter zu einer 5.5°C grösseren Tagesspanne auf der Brandfläche führten. In der obersten Lage betrug der Unterschied in der Tagesspanne im Winter dagegen lediglich 3.1 °C. Im Vergleich dazu betrug die Differenz im Sommer in tiefen Lagen nur 1.6 °C und in hohen Lagen 0.5°C.

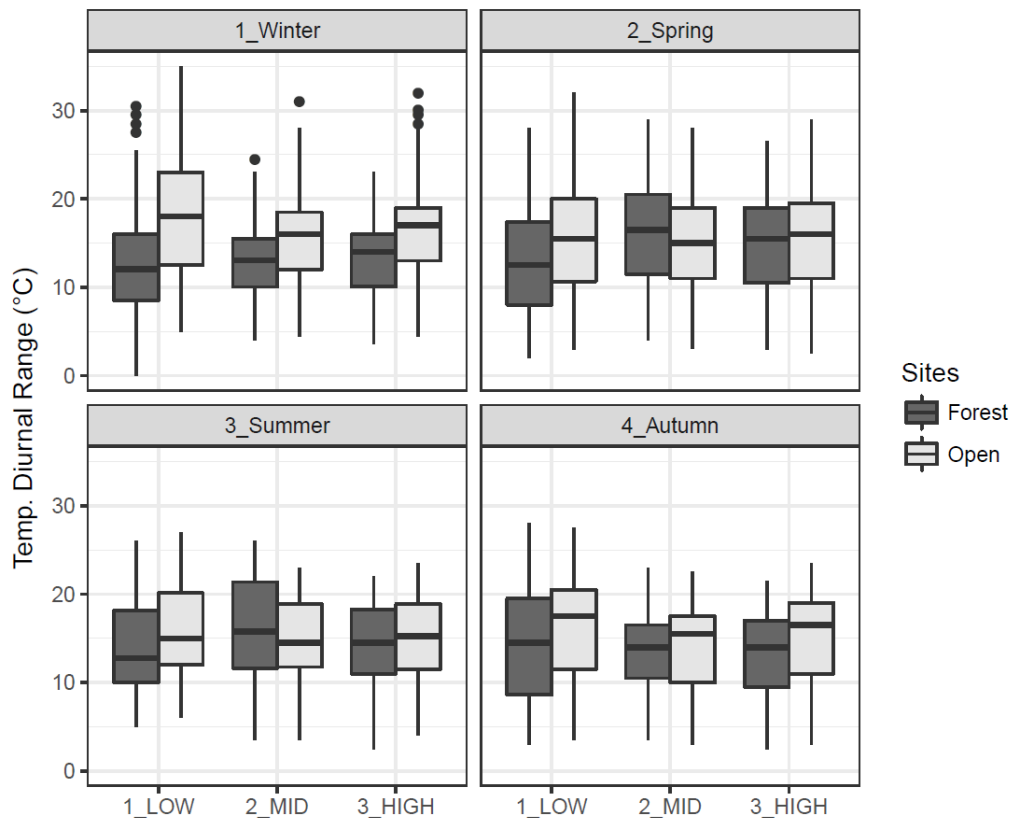


Abbildung 5 Temperaturspanne im Tagesverlauf (Diurnal Range, Differenz zwischen Tagesmaximum und Tagesminimum) pro Jahreszeit und Höhenstufe ('LOW': 1840-1940; 'MID': 1990-2090; 'HIGH' 2140-2240) für Brandfläche und angrenzenden Wald bei Il Fuorn. Anmerkung: im Boxplot ist der Median als Lagemass dargestellt, während sich der Text auf den Mittelwert bezieht. Beide Lagemasse sind jedoch aufgrund der annähernden Normalverteilung der Daten praktisch identisch.

4.1.3 Extremwerte

Im Hinblick auf die maximalen und minimalen Temperaturunterschiede, die pro Jahreszeit und Höhenstufe auftraten, zeigte sich, dass die Brandfläche im Frühling im Verlauf mancher Tage bis zu +20°C höhere Temperaturen aufwies als der angrenzende Wald, während zu anderen Zeitpunkten bis zu -10°C tiefere Temperaturen gemessen wurden. Dieser beträchtliche Unterschied in den Temperaturextremen trat besonders in tiefen Lagen auf und nahm mit zunehmender Höhenlage ab (Abb.6). Zudem zeigte sich, dass die Unterschiede im Frühling am stärksten und im Sommer am niedrigsten waren.

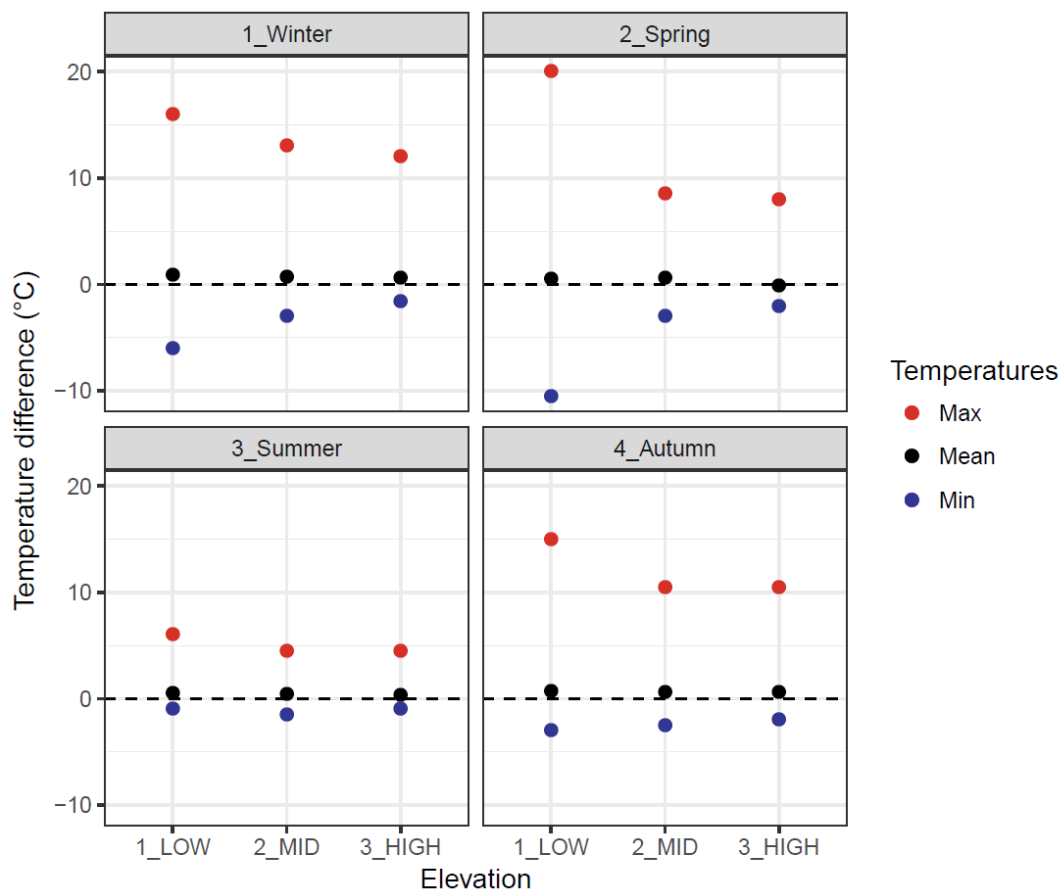


Abbildung 6 Temperaturextreme (gemessene Maximale und Minimale Temperaturdifferenz im Tagesverlauf zwischen Brandfläche und angrenzendem Wald) pro Jahreszeit und Höhenstufe ('LOW': 1840-1940; 'MID': 1990-2090; 'HIGH' 2140-2240).

4.1.4 Unterschiede im Tagesverlauf

An sonnigen Tagen wies die Brandfläche typischerweise einen deutlich abweichenden Tagesgang der Temperatur auf verglichen mit jenem im angrenzenden Wald (siehe Abb.7 für einen typischen Strahlungstag). Dieser war durch eine frühere Erwärmung im Verlauf des Vormittages, sowie eine höhere Maximaltemperatur am frühen Nachmittag gekennzeichnet. Im Verlauf des Abends glichen sich die Temperaturen aneinander an und waren während der Nacht nahezu identisch.

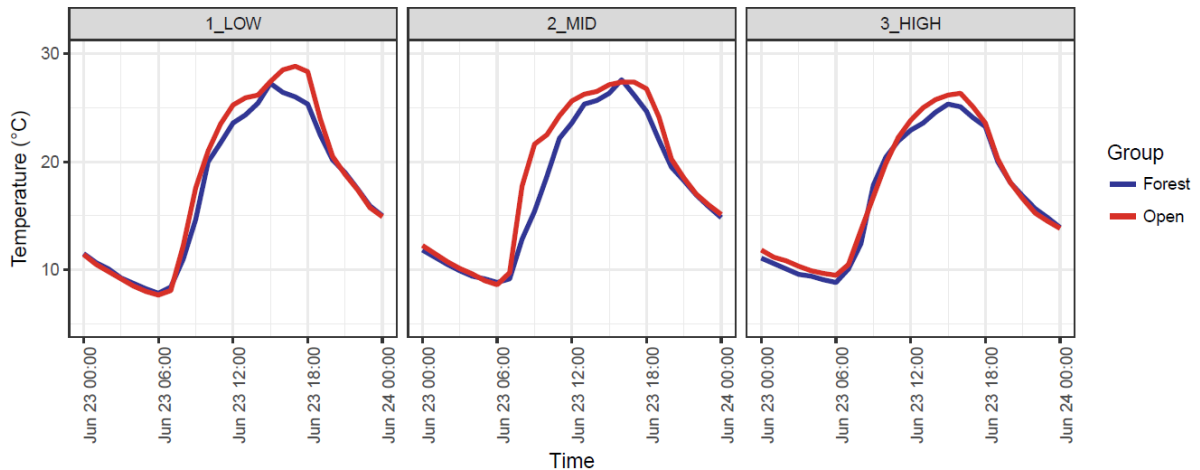


Abbildung 7 Tagesverlauf der Temperatur auf der Brandfläche und in angrenzendem Wald an einem Strahlungstag (23.06.2016).

An bewölkten Tagen (siehe Abb.8) waren nur geringe Unterschiede zu erkennen, welche v.a. zur Mittags- und frühen Nachmittagszeit auftraten.

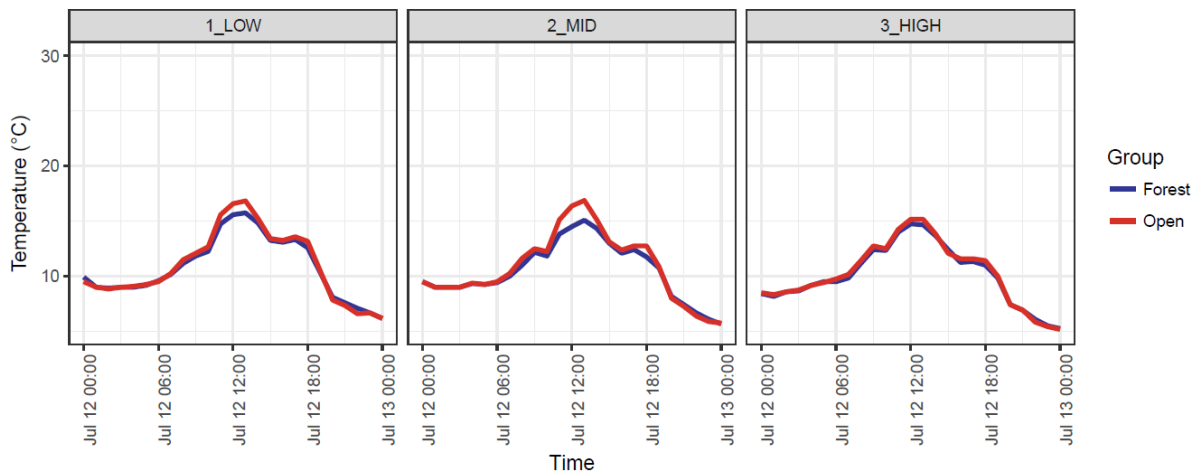


Abbildung 8 Tagesverlauf Temperatur auf der Brandfläche und in angrenzendem Wald an einem bewölkten Tag (12.07.2016).

4.2 Unterschiede entlang des Höhengradienten

Neben den zuvor dargestellten Ergebnissen für Veränderungen der Mittel und Extremwerte mit der Höhe (siehe Abschnitt 4.1) ergab sich für Brandfläche und angrenzenden Wald kein konsistentes Muster, das auf eine typische Temperaturabnahme (*'Lapse rate'*) mit der Höhe hindeuten würde (Abb.9). Im Bereich von 1840 m bis 2040 m nahm die Temperatur im Winter, Sommer und Herbst sogar tendenziell mit der Höhe zu, während sie in Lagen über 2040m eher konstant blieb. Beide Höhentransekte (Brandfläche und Wald) wiesen grundsätzlich ähnliche Muster auf (siehe auch Appendix A4, für eine Darstellung der Temperaturdifferenzen mit der Höhe in monatlicher Auflösung).

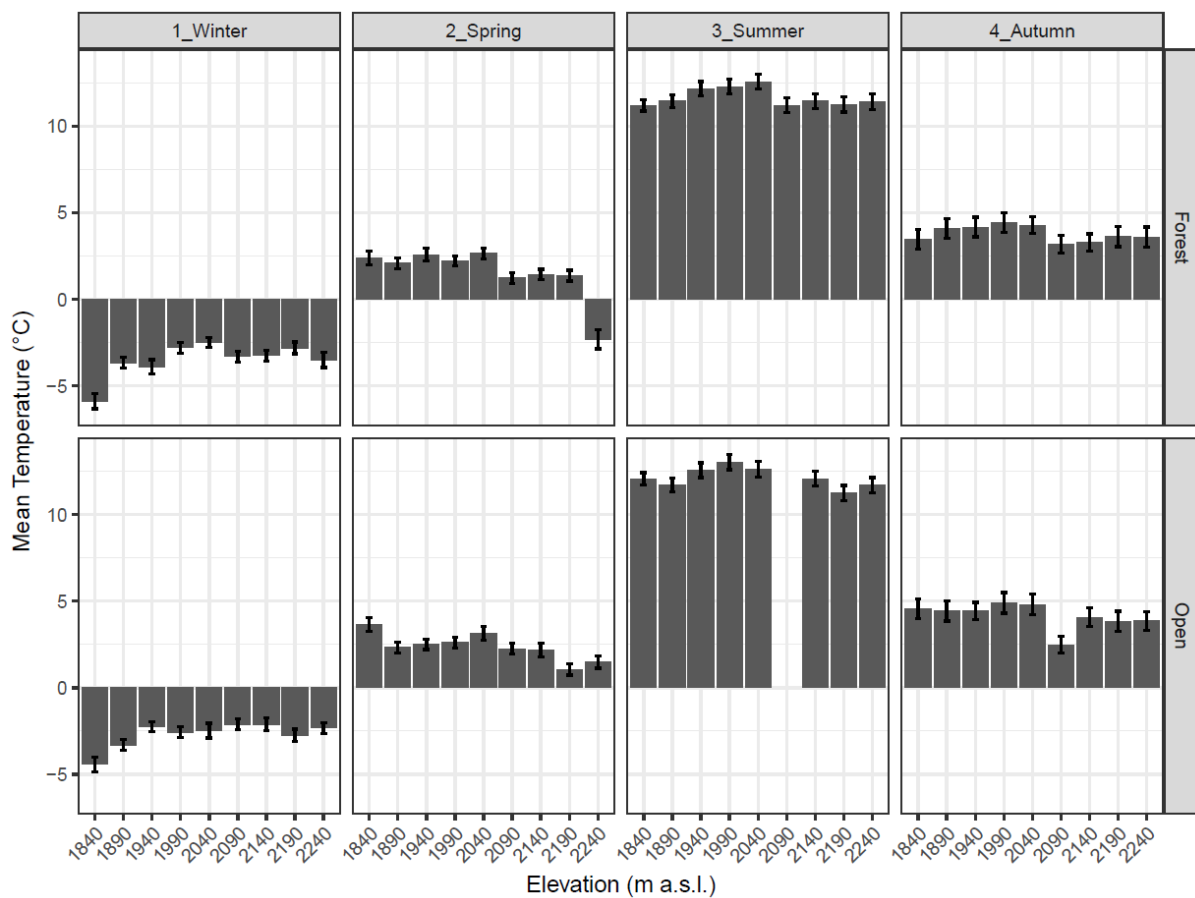


Abbildung 9 Jahreszeitliche Mitteltemperatur (Mittelwert und Standardfehler) für verschiedene Höhenstufen in Brandfläche und Wald

4.3 Vergleich Temperaturbedingungen mit anderen Standorten

4.3.1 Allgemeiner Vergleich

Im Vergleich zum jährlichen Temperaturverlauf der nahe gelegenen Klimastationen 'Stabelchod (Offenland)' und 'Buffalora' wies sowohl die Brandfläche als auch der angrenzende Wald bei Il Fuorn in fast allen Monaten deutlich höhere Temperaturen auf (Abb.10).

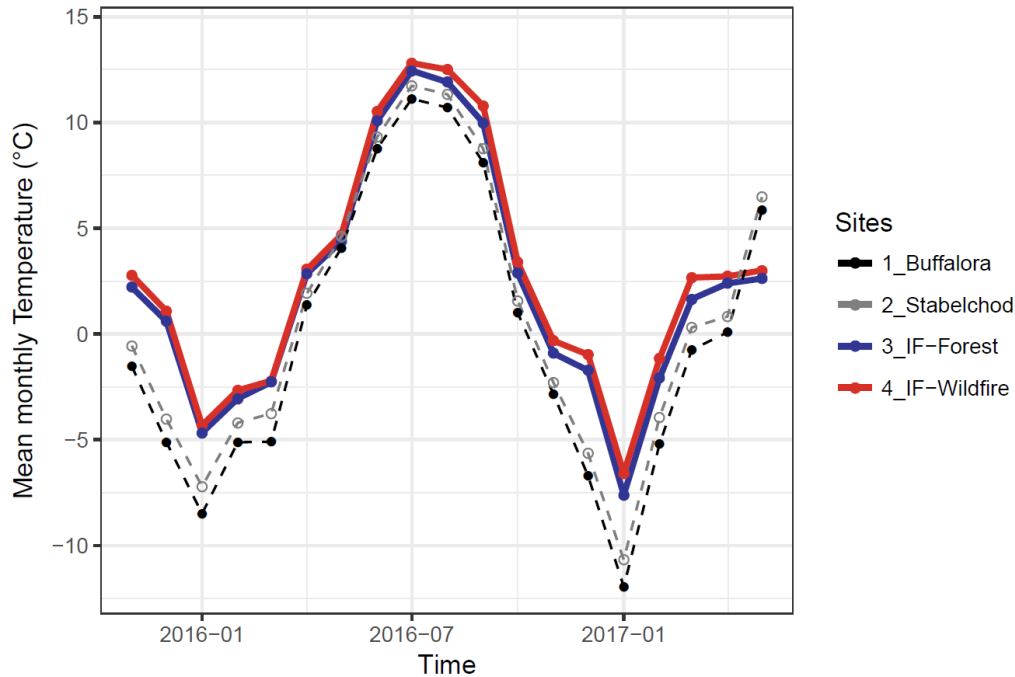


Abbildung 10 Temperaturverlauf (Monatsmittel) für die Klimastationen Buffalora und Stabelchod ('Offenland'), sowie der Temperaturlogger von der Brandfläche und dem angrenzenden Wald bei Il Fuorn. Zur Berechnung der Monatsmittel der Il Fuorn Logger wurde der Mittelwert über alle Höhenstufen gebildet.

Grösste Unterschiede traten dabei in den Wintermonaten auf, während die Unterschiede im Frühling und Sommer am geringsten waren (Tabelle 2).

Tabelle 2: Jahreszeitliche Mitteltemperaturen für Brandfläche und Wald bei Il Fuorn (IF), sowie der Klimastationen bei Stabelchod ('Offenland') und Buffalora. Datenquelle: WSL (Stabelchod), Meteoswiss (Buffalora). Zudem sind Temperaturunterschiede zwischen Brandfläche und Stationsdaten (ST:Stabelchod, BU: Buffalora) angegeben.

Ort	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
IF-Brandfläche	2.18	12.16	4.11	-2.58
IF-Wald	1.81	11.70	3.73	-3.30
Stabelchod (ST)	1.73	10.81	2.66	-6.00
Buffalora (BU)	0.96	11.17	2.05	-7.43
Δ Brandfläche - ST	0.45	1.35	1.44	3.43
Δ Brandfläche - BU	1.22	0.99	2.06	4.85

4.3.2 Vergleich Il Fuorn - Stabelchod

Im direkten Vergleich zeigt sich, dass Unterschiede zwischen Wald und Offenland sowohl in der Mitteltemperatur (Abb.11) als auch in der Temperaturtagesspanne (Abb.12) für den Standort Il Fuorn deutlich grösser ausfielen als für Stabelchod. Während die Mitteltemperaturen in Stabelchod pro Jahreszeit nur geringe Unterschiede zwischen Offenland und Wald aufwiesen ($< 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$), lagen die Unterschiede bei Il Fuorn stets über $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Abb. 11).

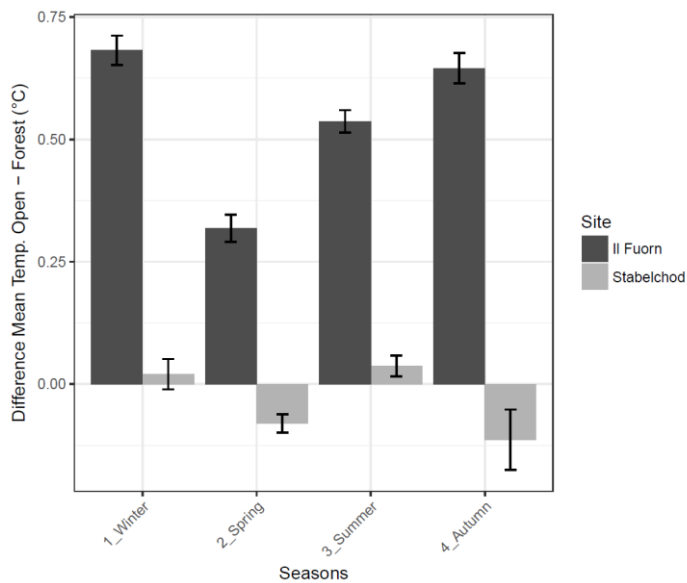


Abbildung 11 Unterschiede Mitteltemperaturen Offenland – Wald (Mittelwert und Standardfehler)

Unterschiede in der mittleren Tagesspanne der Temperatur (Differenz Tagesmaximum zu Tagesminimum) zwischen Wald und Offenland waren im Winter und Herbst bei Il Fuorn mehr als doppelt so hoch wie in Stabelchod (Abb.12).

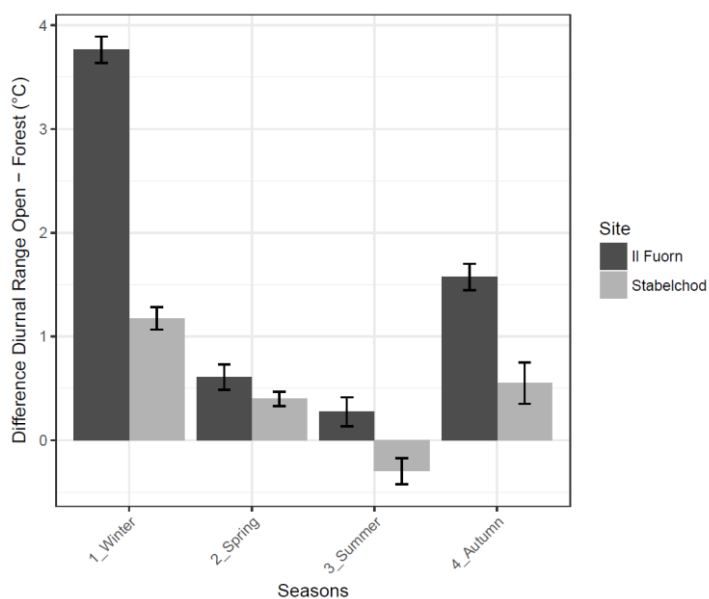


Abbildung 12 Unterschiede Tagesspanne Temperatur Offenland – Wald (Mittelwert und Standardfehler)

5. Diskussion

5.1 Temperaturunterschiede Brandfläche – Wald

Die Messdaten der Temperaturlogger zeigten, dass auf der Waldbrandfläche sowohl im jährlichen Mittel als auch im Monatsmittel wärmere Bedingungen als im angrenzenden Wald herrschten. Dies ist vor allem auf die unterschiedlichen Temperaturgänge im Tagesverlauf zurückzuführen: während die Nachttemperaturen generell geringe Unterschiede aufwiesen, war die Brandfläche meist von einer früheren Erwärmung und einer höheren Maximaltemperatur geprägt.

Die relativ geringen Unterschiede der Nachttemperatur stehen im Gegensatz zur ursprünglichen Erwartung einer höheren nächtlichen Ausstrahlung und damit stärkeren Temperaturabnahme auf der Brandfläche. Wie in den Temperaturextremwerten (Abb.6) dargestellt, trat dieser Effekt zwar teilweise auf, war jedoch nicht so ausgeprägt wie erwartet und wurde durch den stärkeren Erwärmungseffekt tagsüber überwogen. Ebenso trugen die vermutlich höheren Windgeschwindigkeiten auf der Brandfläche offensichtlich nicht zu einer deutlichen Abkühlung im Vergleich zum angrenzenden Wald bei.

Mikrometeorologisch stellt der Wald zum einen ein Gebiet höherer Oberflächenrauigkeit und damit verringerter Windgeschwindigkeit im Vergleich zum Offenland dar (Foken, 2006). Zudem bewirkt der Kronenraum eine deutliche Verringerung des turbulenten Austausches mit der freien Atmosphäre (Baldocchi et al., 2000; Foken, 2006). Im extremsten Fall kann es sogar zu einer 'Entkoppelung' (Foken, 2006) zwischen Waldinnenraum und dem Kronraum kommen, bei dem fast kein Austausch mehr stattfindet. Durch diese Entkoppelung bildet sich ein entsprechend unterschiedliches Mikroklima im Wald, welches durch deutlich höhere Luftfeuchtigkeit und gedämpfte Temperaturgänge gekennzeichnet ist (Foken, 2006).

Im vorliegenden Fall des stellenweise relativ lückigen Bergföhrenwaldes ist diese Entkoppelung vermutlich nicht so stark ausgeprägt wie in typischen gleichförmigen Altbeständen mit einem hohen Kronenschlussgrad (Baldocchi et al., 2000). Dennoch zeigen die Messungen der Luftfeuchte (Appendix A6) im Wald durchgehend höhere Werte auf als im Offenland, was auf eine Reduktion des turbulenten Austausches mit der freien Atmosphäre hinweist. Hierdurch lassen sich auch die niedrigeren Temperaturen im Wald erklären: eintreffende Strahlungsenergie führt zuerst zur Verdunstung (latenter Wärmefluss), bevor eine Erhöhung der Lufttemperatur stattfindet (fühlbarer Wärmefluss) (Foken, 2006). Auf der Waldbrandfläche, bei der sowohl ein schützender Kronenraum wie auch eine Humusschicht mit entsprechender Wasserspeicherkapazität fehlen (siehe auch Zou et al., 2007), ist das verfügbare Wasser wesentlich schneller verdunstet und eintreffende Strahlungsenergie führt folglich zu einer stärkeren Erwärmung des Bodens.

5.2 Unterschiede entlang des Höhengradienten

Entgegen der Erwartung zeigten die Messdaten der Logger in Wald und Offenland keine einheitliche Temperaturabnahme (*'Lapse rate'*) von 2 °C über die 300 m Höhendifferenz. Im Winter und Sommer trat sogar der gegenteilige Effekt einer Temperaturzunahme mit der Höhe (bis etwa 2040 m Höhe) auf.

Ein möglicher Prozess, der zu diesem 'umgekehrten Temperaturgradienten' führen könnte, ist der sog. Kaltluftabfluss (Foken, 2006). In Anbetracht der Lage nahe der kältebedingten Waldgrenze, sowie der Steilheit des Hanges, ist die Annahme plausibel, dass kalte Luftmassen aus Quellgebieten an oder oberhalb der Waldgrenze den Hang hinabfließen und sich in tiefer gelegenen Mulden sammeln. Dieser Effekt könnte die ungewöhnlich tiefen Temperaturen erklären, die beim niedrigsten Logger auf 1840 m auftreten. Zusätzlich sammeln sich Schneemassen im Spätwinter und Frühling ebenfalls am unteren Hangende, wodurch es zu einer späteren Ausaperung in tiefen Lagen kommt. Die Temperaturlogger auf der Brandfläche waren jedoch ab 1940 m eher an Kuppenlagen angebracht, wodurch sich der Effekt des Kaltluftabflusses und der Schneeakkumulation verringern dürfte.

Zudem ist es bemerkenswert, dass der Transekt im Wald sehr ähnliche höhenabhängige Muster aufwies wie die Brandfläche. Aufgrund der blockierenden Wirkung des dichten Bewuchses ist anzunehmen, dass die Bedeutung des Kaltluftabflusses und der Schneeakkumulation im Wald geringer sein sollte als auf der Brandfläche. Da auch im Wald (teilweise noch deutlicher als auf der Brandfläche) das Muster des 'umgekehrten Temperaturgradienten' vorherrschte, ist also davon auszugehen, dass dies auf einen anderen Prozess zurückzuführen ist.

Eine Analyse der jährlichen Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit der Topographie (siehe Appendix A5) zeigte, dass die Einstrahlung mit zunehmender Höhe stark zunahm. Dies ist vor allem auf die stärkere Sonnenexposition mit zunehmender Höhe und die abnehmende Beschattung durch das umgebende Gelände zurückzuführen. Da Temperaturbedingungen in erster Linie von der direkten Sonneneinstrahlung bestimmt werden (Foken 2006), liegt somit der Schluss nahe, dass der beobachtete 'inverse Temperaturgradient' vor allem auf die Unterschiede in der Sonneneinstrahlung zurückzuführen sind. Es ist zudem bemerkenswert, dass auch die Temperaturlogger im Wald, trotz der beschattenden Wirkung des Kronenraumes, diesem Einstrahlungsmuster folgen.

Insgesamt betrachtet, scheint folglich das Lokalklima entlang der Höhengradienten mehr durch topographisch bedingte Sonnenexposition als durch mikroklimatische Effekte wie dem Kaltluftabfluss und der Schneeakkumulation kontrolliert zu sein.

5.3 Vergleich zu Klimastationen Stabelchod und Buffalora

Im Vergleich zu den Klimastationen Stabelchod und Buffalora lagen die gemessenen Temperaturen auf der Waldbrandfläche sowie im angrenzenden Wald in allen Jahreszeiten mit 0.5 bis 4.9°C deutlich höher. Dies lässt sich vor allem auf die sonnenexponiertere Lage der Waldbrandfläche am steilen Südhang bei Il Fuorn zurückführen, welche mit 169 W m⁻² im Mittel ca. 10% höhere Strahlungsmengen erhält als die näher am Talboden gelegenen Klimastationen Stabelchod und Buffalora (beide 153 W m⁻², siehe Appendix A5).

Neben dem Effekt unterschiedlicher Sonneneinstrahlung können auch die unterschiedlichen Messapparaturen zu den relativ grossen Temperaturunterschieden beitragen. Zum einen könnte die niedrigere Position der Temperaturlogger über dem Erdboden (1 m) im Vergleich zu der Messhöhe der Klimastationen (1.5 m) zu verschiedenen Messwerten führen, da sich in Bodennähe starke Temperaturgradienten ausbilden können (Foken, 2006). Zum anderen ist nicht auszuschliessen, dass die höhere Emissivität des Holzes und die relativ geringe Durchlüftung im Vergleich zum Messaufbau standardisierter Klimastationen (WMO 2008) zu einem Wärmestau und damit höheren gemessenen Temperaturen führt (siehe Foken, 2006). In einem Vorversuch mit verschiedenen Messapparaturen (trockener, befeuchteter Holzpflock, in Plastikhülle, und offene Lage mit Strahlungs- und Regenschutz) zeigte sich jedoch, dass die Abweichungen der Apparaturen untereinander meist nahe oder nur knapp über dem systematischen Fehler der Temperaturmessung (± 0.5 °C) lagen (Haller, 2015).

Einen zusätzlichen Anhaltspunkt zur Grössenordnung möglicher Messapparatur-Effekte liefert die Studie von Tarara und Hoheisel (2007), welche verschiedene Messapparaturen mit einem standardisierten Design ('standard Gill radiation shield') vergleicht. Hier zeigen die Autoren auf, dass die Unterschiede mit zunehmender Einstrahlung und abnehmender Windgeschwindigkeit rapide ansteigen. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten (< 1.0 m s⁻¹) und hohen Einstrahlungen (> 600 W m⁻²) können dabei Temperaturunterschiede von bis zu 5°C auftreten. Da im Fuorn-Gebiet Bedingungen mit niedrigen Windgeschwindigkeiten jedoch relativ selten sind (mittlere Windgeschwindigkeit bei Buffalora von 1.3 m s⁻¹, Ketterer und Haller, 2009) und die mittlere Strahlungsintensität deutlich niedriger liegt (Mittelwert: 153 W m⁻², Maximalwert: 388 W m⁻², Meteoswiss, 2017), ist davon auszugehen, dass die Temperaturunterschiede weniger extrem ausfallen dürften. Für die gemessenen Mittelwerte für Windgeschwindigkeit und Strahlungsintensität bei Buffalora läge die Temperaturdifferenz nach Tarara und Hoheisel (2007) in der Grössenordnung von etwa 1°C. Obgleich die vorliegende Messanordnung von derjenigen von Tarara und Hoheisel (2007) abweicht, liefert ihre Studie zumindest eine grobe Abschätzung, welche Unterschiede unter den gegebenen Umweltbedingungen mindestens zu erwarten sind.

Trotz dieses Messapparatur-Effektes erlaubt die vorliegende Messanordnung einen relativen Vergleich von Wald zu Offenland, da an beiden Transekten gleiche Messapparaturen verwendet wurden. Der Vergleich zwischen Wald und Offenland zeigte wesentlich grössere Unterschiede für die Brandfläche bei Il Fuorn als für die Alp Stabelchod. Dies lässt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die extremeren Umweltbedingungen auf der Brandfläche zurückführen (siehe Abschnitt 5.1). Während die Bedingungen auf der Brandfläche durch den steilen, geröllreichen Hang, meist fehlenden Bewuchs und Humusschicht gekennzeichnet ist (Geissler und Hartmann, 2000), wirken die Bedingungen bei der Alp Stabelchod durch die flachere Neigung, die besseren Bodenbedingungen und den dichten Grasbewuchs (Schütz et al., 2003) ausgleichender auf die Temperaturentwicklung. Diese Unterschiede machen sich insbesondere

im Fall der Tagesspanne der Temperatur bemerkbar, welche auf der Brandfläche teilweise doppelt so hoch ausfielen wie auf Stabelchod.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich der Brandfläche bei Il Fuorn mit den anderen beiden Standorten eindrücklich auf, dass auf der Brandfläche deutlich wärmere Bedingungen herrschen und extremere Temperaturunterschiede als zwischen Wald und offener Weide auftreten.

5.4 Bedeutung für die Vegetationsentwicklung

Die auf der Brandfläche vorherrschenden höheren Temperaturmittelwerte und Temperaturtagesspannen, sowie extremere Minimal- und Maximal-Temperaturen können eine Reihe physiologischer Stress-Effekte auf die Verjüngung der Bergföhre (*Pinus mugo*) haben: (1) Hitzestress, (2) Kältestress, (3) Photoinhibition durch niedrige Temperaturen und (4) Trockenstress.

Direkte Schäden durch Hitze treten vor allem durch die Zerstörung der Zellmembran oder durch biochemischen Abbau der Zellmembran bei längerfristiger Hitzeexposition auf (Binder et al. 1995). Für die meisten Nadelbäume treten unmittelbar Hitzeschäden ('thermal breakpoints') erst über 50°C auf (Binder et al., 1995). Es können jedoch bereits bei niedrigeren Temperaturen indirekte Effekte durch Einschränkung wesentlicher biologischer Prozesse auftreten (z.B., verringerte Photosynthese, Respiration). So berichteten z.B. Colombo und Timmer (1992) eine Verjüngungsmortalität von über 40% bei mehrmaligem Auftreten von Temperaturen über 40 °C innerhalb von drei Wochen. Die auf der Brandfläche gemessenen Maximaltemperaturen von 32.5°C (siehe Appendix A2) liegen jedoch deutlich unter diesen kritischen Schwellenwerten. Insgesamt ist es daher wahrscheinlich, dass Temperaturstress auf der Brandfläche das Wachstum der Verjüngung einschränkt, eine direkte Mortalität durch extreme Hitzeexposition ist jedoch eher unwahrscheinlich.

Nahe der Baumgrenze spielt das Auftreten von Kältestress eine wichtige Rolle für die Baumverjüngung (Körner und Paulsen, 2004). Hierbei ist jedoch eher die Bodentemperatur ausschlaggebend, welche das Wurzelwachstum begrenzt (Körner und Paulsen, 2004). Um zu ermitteln, in welchem Ausmass niedrige Bodentemperaturen die Wiederbewaldung auf der Brandfläche begrenzen, müssten daher weitere Untersuchungen mit Hilfe von Boden-Temperaturloggern ausgeführt werden. Das Auftreten von oberirdischen Schäden durch niedrige Lufttemperaturen ist dagegen abhängig von der betroffenen Baumart, sowie vom Zeitpunkt des Auftretens (Muffler et al., 2016). In Anbetracht der hohen Kälteresistenz der vorherrschenden Baumart *Pinus mugo* (Schumacher et al., 2004) ist es eher unwahrscheinlich, dass direkte Schäden durch Kälteeinwirkung die Verjüngung unterbindet.

Neben den direkten Kälteschäden ist in den letzten Jahren zunehmend das Phänomen der 'Low temperature photoinhibition' (Germino und Smith, 1999) in den Fokus der Forschung getreten, welches die Verjüngung nahe der Waldgrenze stark einschränken kann. Hierbei handelt es sich um das gekoppelte Auftreten von niedrigen Nachttemperaturen, gefolgt von starker Sonneneinstrahlung und hohen Temperaturen am Folgetag (Germino et al., 2002). Diese Kombination von Temperatur und Strahlungsbedingungen in der Nacht und dem darauffolgenden Tag hat meist einen wesentlich stärkeren Effekt auf die Verjüngung als jeder Einzelprozess für sich (Germino et al., 2002). Die höchste Überlebensrate und der grösste

Verjüngungserfolg nahe der Baumgrenze treten daher oft in Jahren mit relativ geringen Differenzen in der Temperaturtagesspanne auf (Germino et al., 2002). Da die Temperaturtagesspanne im Falle der Brandfläche wesentlich höhere Werte aufwies als im benachbarten Wald, ist es daher relativ wahrscheinlich, dass das Phänomen der ‘low temperature photoinhibition’ die Photosyntheseleistung der Verjüngung auf der Brandfläche reduziert.

Zudem kann das Auftreten von Trockenstress die Verjüngung reduzieren. Trockenheit kann die Baum-Mortalität kurzfristig durch den Effekt des ‘Hydraulic failure’ (Wasserkavitation im Xylem) (McDowell et al., 2008), sowie langfristig durch den Effekt der ‘Carbon starvation’ (verringerte Kohlenstoffaufnahme durch Stomata-Schluss bei Trockenheit) drastisch erhöhen (Allen et al., 2010). Die geringmächtigen, skelettreichen Geröllböden auf der Brandfläche, welche zudem meist keine Humusschicht besitzen, zeichnen sich durch eine sehr geringe Wasserspeicherkapazität aus. Bei hohen Temperaturen ist zu erwarten, dass das verfügbare Bodenwasser daher in relativ kurzer Zeit verdunstet. Die Vegetation (insbesondere die Verjüngung, welche noch keine tiefreichenden Wurzeln ausgebildet hat) leidet daher vermutlich relativ rasch unter beträchtlichem Trockenstress, welcher das Wachstum stark limitieren kann (Allen et al., 2010).

Zusammenfassend lässt sich schliessen, dass die direkte Mortalität durch extreme Temperaturbedingungen auf der Brandfläche wahrscheinlich eine eher untergeordnete Rolle für die Baumverjüngung spielt. Jedoch bewirkt die reduzierte Photosynthese-Leistung (besonders durch ‘Low temperature photoinhibition’ und Trockenheit) ein sehr langsames Wachstum und macht die Verjüngung zudem anfällig auf zusätzliche Stressfaktoren, wie z.B. das Auftreten von Herbivorie. Unter den extremen Umweltbedingungen auf der Brandfläche besitzt die Baumverjüngung daher hinsichtlich ihres Kohlenstoffhaushaltes wenig Ressourcen, um auftretende Schäden, z.B. durch Verbiss von Huftieren, zu kompensieren.

6. Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Untersuchung entlang der beiden Höhengradienten zeigten, dass die Brandfläche durch deutlich extremere Temperaturbedingungen als der angrenzende Wald gekennzeichnet ist.

Auf der Brandfläche herrschten im Mittel um 0.25°C wärmere Bedingungen, und eine um 1.8°C grössere Tagestemperaturspanne als im angrenzenden Wald. Besonders deutlich zeigten sich die Unterschiede in den Temperaturextremwerten, die bis zu $+20^{\circ}\text{C}$ höhere Maximaltemperaturen und bis zu -10°C niedrigere Minimaltemperaturen aufwiesen. Im Tagesverlauf zeigte sich, dass die Brandfläche abends und nachts ähnliche Temperaturwerte wie im Wald aufwies, jedoch im Lauf des Vormittags eine deutlich schnellere Erwärmung und mittags bzw. am frühen Nachmittag höhere Maximalwerte auftraten.

Entlang des Höhengradienten zeigte sich, dass die Temperaturunterschiede in niedrigeren Lagen (1840-1940 m ü.M.) am höchsten waren und mit zunehmender Höhe abnahmen. Eine erwartete Temperaturabnahme von 2°C über den Höhengradienten war jedoch nicht einheitlich erkennbar.

Im Vergleich zu den Klimastationen Stabelchod und Buffalora wiesen die Temperaturlogger bei Il Fuorn teilweise deutlich höhere Temperaturen auf. Dieser Unterschied ist vor allem durch die höhere Einstrahlung auf dem sonnenexponierten Südhang zu erklären. Insgesamt ist jedoch der Vergleich mit den Klimastationen durch die unterschiedliche Messapparatur (Temperaturlogger in Holzpflocken im Vergleich zu Messungen mit aktiver Belüftung und standardisiertem Strahlungsschild) nur eingeschränkt möglich.

In Bezug auf die Vegetation, insbesondere die Baumverjüngung, liegt der Schluss nahe, dass weniger die auftretenden Temperaturextreme als die daraus resultierende erhöhte Trockenheit und das Phänomen der 'Low temperature photoinhibition' die Photosynthese-Leistung der Pflanzen auf der Waldbrandfläche reduzieren. Die geringeren Kohlenstoff-Ressourcen, die der Verjüngung auf der Brandfläche dadurch zur Verfügung stehen, verringert folglich ihre Resilienz gegen zusätzlich auftretende Störungen, wie etwa Wildverbiss oder Schäden durch Geröllbewegung und Schnee-Abrasion. Zudem verlängert sich durch das langsame Wachstum der Zeitraum, in dem die Verjüngung dem Wildverbiss ausgesetzt ist.

Genauere Erkenntnisse über die Temperaturbedingungen in unmittelbarer Bodennähe (und damit näher an den 'tatsächlichen Lebensbedingungen' der Vegetation) werden derzeit durch weitere Forschungsprojekte mit Hilfe einer Thermalbildkamera erzielt. In Kombination mit der vorliegenden Studie zeichnet sich somit ein sehr detailliertes Bild der Temperaturbedingungen auf der Brandfläche von Il Fuorn. Diese Ergebnisse sind nicht nur für die Untersuchung der Sukzession im Nationalpark von Bedeutung, sondern tragen zu einem besseren Verständnis von langfristigen Vegetationsdynamiken nach Störungsereignissen unter extremen Umweltbedingungen bei.

Danksagung

Besonderer Dank gilt Ruedi Haller und Pia Anderwald für Anregungen und wissenschaftliche Diskussionen, Christian Rossi für die Hilfe bei der Feldarbeit, Roberto Beth für Hilfe bei der Verwendung von ArcGIS, Tobias Ebner für die Hilfe im Bereich IT sowie Matthias Haeni von der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) für die Bereitstellung der Daten der Klimastation Stabelchod.

Literaturliste

- Allen, C.; Macalady, A.K.; Chenchouni, H.; Bachelet, D.; McDowell, N.; Vennetier, M.; Kitzberger, T.; Rigling, A.; Breshears, D.D.; Hogg, E.H.; Gonzalez, P.; Fensham, R.; Zhang, Z.; Castro, J.; Demidova, N.; Lim, J.-H.; Allard, G.; Running, S.W.; Semerci, A.; Cobb, N. (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*. 259, 660-684.
- Baldocchi, D.D.; Beverly, E.L.; Anthoni, P.M. (2000) On measuring and modelling energy fluxes above the floor of a homogenous and heterogenous conifer forest. *Agricultural and Forest Meteorology*. 102, 187-206.
- Bader, M.Y.; van Geloof, I.; Rietkerk, M. (2007) High solar radiation hinders tree regeneration above the alpine treeline in northern Ecuador. *Plant Ecology*. 191, 33-34.
- Binder, W.D.; Fielder, P. (1995) Heat damage in boxed white spruce (*Picea glauca* [Moench.] Voss) seedlings: Its pre-planting detection and effect on field performance. *New Forests*. 9, 237-259.
- Colombo, S.J.; Timmer, V.R. (1995) Limits of tolerance of high temperatures causing direct and indirect damage to black spruce. *Tree Physiology*. 11, 95-104.
- ESRI (2015) ArcGIS Desktop: Release 10.3.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Flury, M. (1988) Mikroklimatische und standortkundliche Untersuchungen in der alpinen Stufe des Schweizerischen Nationalparks. Diplomarbeit. Geographisches Institut der Universität Zürich. 129 Seiten.
- Foken, T. (2006) Angewandte Meteorologie - Mikrometeorologische Methoden. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 326 Seiten.
- Germino, M.J.; Smith, W.K. (1999) Sky exposure, crown architecture, and low-temperature photoinhibition in conifer seedlings at alpine treeline. *Plant, Cell and Environment*. 22, 407-415.
- Germino, M.J.; Smith, W.K.; Resor, C. (2002) Conifer seedling distribution and survival in an alpine-treeline ecotone. *Plant Ecology*. 162, 157-168.

- Geissler, P.; Hartmann, J. (2000) Vegetation dynamics in a mountain pine stand burnt down in 1951. In: Schütz, M; Krüsi, B.O.; Edwards, P.J. (eds): Succession research in the Swiss National Park. Nat park-Forsch Schweiz 89, 107-129.
- Haller, R. (2015) Temperaturlogger in unterschiedlichem Gehäuse – Vergleiche. Projektbericht. Schweizerischer Nationalpark, Zernez.
- Ketterer, C.; Haller, R. (2009) 200 Jahre Wetter, Witterung und Klima im Gebiet des Schweizerischen Nationalpark auf der Grundlage von Messungen und regionalen Klimasimulationen – Rückblick und Szenarien.
- Körner, C.; Paulsen, J. (2004) A world-wide study of high altitude treeline temperatures. Journal of Biogeography. 31, 713-732.
- McDowell, N.; Pockman, W.T.; Allen, C.D.; Breshears, D.D.; Cobb, N.; Kolb, T.; Plaut, J.; Sperry, J.; West, A.; Williams, D.G.; Yezzer, E.A. (2008) Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? New Phytologist. 178, 719-739.
- Muffler, L.; Beierkuhnlein, C.; Aas, G.; Jentsch, A.; Schweiger, A.H.; Zohner, C.; Kreyling, J (2016) Distribution ranges and spring phenology explain late frost sensitivity in 170 woody plants from the Northern Hemisphere. Global Ecology and Biogeography. 25, 1061-1071
- R Development Core Team (2016) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Scheurer, T; Hartmann, J. (2013) Waldbrandfläche Il Fuorn – Gräser ersetzen Bergföhren. In: Haller, H.; Eisenhut, A.; Haller, R. (eds): Atlas des Schweizerischen Nationalparks – Die ersten 100 Jahre. Nat park – Forsch Schweiz. 99/I, 198-199
- Schumacher, S.; Bugmann, H.; Mladenoff, D.J. (2004) Improving the formulation of tree growth and succession in a spatially explicit landscape model. Ecological Modelling. 180, 175-194
- Schütz, M.; Wohlgemuth, T.; Achermann, G.; Krüsi, B.O.; Grämiger, H. (2000): Influence of increasing grazing pressure on species richness in subalpine grassland in the Swiss National Park. In: Schütz, M; Krüsi, B.O.; Edwards, P.J. (eds): Succession research in the Swiss National Park. Nat park-Forsch Schweiz. 89, 39-65.
- Schütz, M.; Risch, A.C.; Leuzinger, E.; Krüsi, B.O.; Achermann, G. (2003) Impact of herbivory by red deer (*Cervus elaphus* L.) on patterns and processes in subalpine grasslands in the Swiss National Park. Forest Ecology and Management. 181, 177-188.
- Tarara, J.M.; Hoheisel, G.-A. (2007) Low-cost Shielding to Minimize Radiation Errors of Temperature Sensors in the Field. HortScience. 42, 1372-1379.
- Trümpy, R; Schmid, SM; Conti, P; Froitzenheim, N, (1997): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:50 000 des Schweizerischen Nationalparks. Nat park – Forsch Schweiz. 87, 1-40.
- Whiteman, C.D. (2000) Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications. Oxford University Press. 276 Seiten.

- Wild, R.; Zsak, K. (2012) Huftierbeobachtungen auf der Brandfläche Il Fuorn im Schweizerischen Nationalpark (1989 – 2012). Arbeitsbericht zur Nationalparkforschung. Schweizerischer Nationalpark. Zerne. 47 Seiten.
- WMO (2008) Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. World Meteorological Organisation WMO-Report No.8. Geneva, Switzerland. 681 Seiten.
- Zimmermann, S.; Lüscher, P.; Egli, M. (2013) Bodenkartierung im SNP – Ein offenes Feld. In: Haller, H.; Eisenhut, A.; Haller, R. (eds): Atlas des Schweizerischen Nationalparks – Die ersten 100 Jahre. Nat park – Forsch Schweiz. 99/I, 36-37.
- Zou, C.B.; Barron-Gafford, G.A.; Breshears, D.D. (2007) Effects of topography and woody plant canopy cover on near-ground solar radiation: Relevant energy inputs for ecohydrology and hydrogeology. Geophysical Research Letters. 34, 1-6.

Appendix:

A1 - Vergleich Temperaturlogger USB und iButton

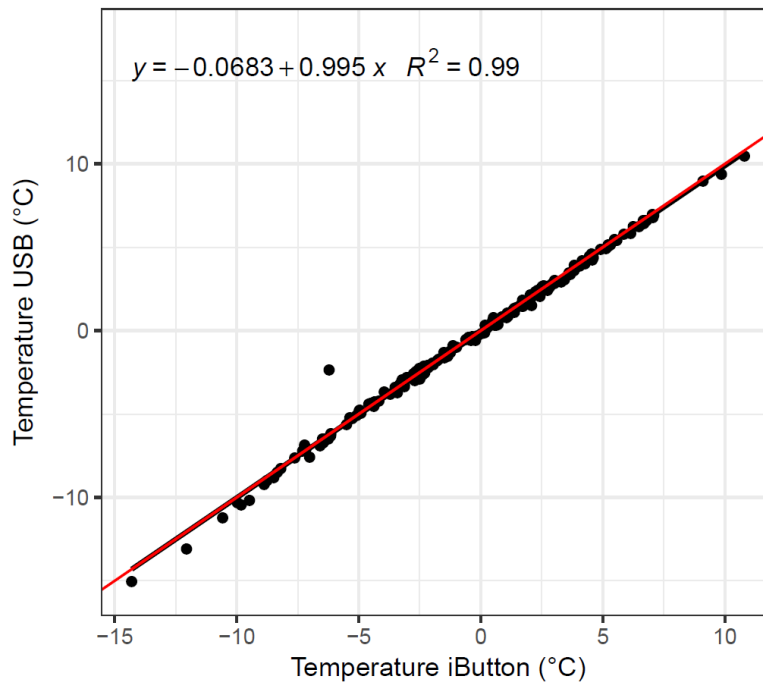


Abbildung 13 Vergleich gemessene Temperatur (°C) von USB-Logger und iButton Logger auf 2090 und 2190 m

A2 - Vergleich monatliche Temperaturen auf Brandfläche und Wald bei Il Fuorn

Tabelle A2.1 Monatliche Mitteltemperaturen (Mittelwerte) sowie Temperaturunterschiede (Differenz zwischen Mittelwerten) zwischen Brandfläche und Wald, in jeweils drei Höhenstufen ('LOW': 1840-1940; 'MID': 1990-2090; 'HIGH' 2140-2240)

Elevation	Group	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1_LOW	Open	-6.10	-1.71	0.81	3.07	4.76	10.30	12.99	12.70	10.89	3.58	0.59	-1.25
	Forest	-7.60	-2.41	0.52	2.65	4.37	9.80	12.63	12.01	9.91	2.87	-0.84	-2.56
	Difference	1.49	0.71	0.29	0.42	0.40	0.50	0.36	0.70	0.97	0.71	1.43	1.31
2_MID	Open	-5.14	-1.71	0.56	3.16	4.12	11.51	13.36	13.09	11.18	3.82	0.73	0.18
	Forest	-5.68	-2.48	-0.34	2.83	3.80	10.66	12.65	12.20	10.36	3.33	0.56	-0.21
	Difference	0.54	0.77	0.89	0.34	0.32	0.85	0.71	0.89	0.83	0.49	0.17	0.39
3_HIGH	Open	-5.44	-2.15	0.22	2.23	2.63	10.25	12.27	11.93	10.45	3.21	0.60	0.61
	Forest	-6.23	-2.68	-0.54	2.17	3.16	9.95	12.08	11.53	9.69	2.72	-0.46	-0.25
	Difference	0.79	0.53	0.76	0.05	-0.53	0.30	0.19	0.39	0.76	0.49	1.06	0.85

0Appendix:

Tabelle A2.2 Monatliche Maximaltemperaturen sowie Temperaturunterschiede zwischen Brandfläche und Wald, in jeweils drei Höhenstufen ('LOW': 1840-1940; 'MID': 1990-2090; 'HIGH' 2140-2240)

Elevation	Group	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1_LOW	Open	21.00	21.50	21.00	23.00	23.00	30.00	29.50	32.50	28.00	20.00	21.50	19.50
	Forest	11.50	18.50	23.00	24.50	22.50	29.50	32.50	31.00	29.50	22.50	22.50	12.50
	Difference	9.50	3.00	-2.00	-1.50	0.50	0.50	-3.00	1.50	-1.50	-2.50	-1.00	7.00
2_MID	Open	17.56	20.12	20.50	22.00	22.12	28.00	29.00	31.00	26.50	19.00	21.00	18.00
	Forest	10.00	15.50	22.50	24.50	22.50	29.50	34.50	32.50	29.50	17.00	19.50	15.00
	Difference	7.56	4.62	-2.00	-2.50	-0.38	-1.50	-5.50	-1.50	-3.00	2.00	1.50	3.00
3_HIGH	Open	20.50	21.50	21.00	22.00	25.58	28.00	29.00	32.00	28.00	25.00	24.50	19.00
	Forest	11.50	17.13	21.00	21.00	21.14	27.00	29.00	30.50	25.00	22.00	20.00	15.00
	Difference	9.00	4.37	0.00	1.00	4.44	1.00	0.00	1.50	3.00	3.00	4.50	4.00

0Appendix:

Tabelle A2.3 Monatliche Minimaltemperaturen sowie Temperaturunterschiede zwischen Brandfläche und Wald, in jeweils drei Höhenstufen ('LOW': 1840-1940; 'MID': 1990-2090; 'HIGH' 2140-2240)

Elevation	Group	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1_LOW	Open	-23.71	-17.14	-15.62	-15.00	-6.54	-0.50	-0.50	0.00	-0.50	-9.00	-17.00	-14.00
	Forest	-22.06	-16.03	-15.03	-13.50	-5.49	0.00	0.00	1.00	0.00	-7.50	-15.50	-13.00
	Difference	-1.65	-1.11	-0.60	-1.50	-1.05	-0.50	-0.50	-1.00	-0.50	-1.50	-1.50	-1.00
2_MID	Open	-22.59	-16.05	-15.00	-14.00	-7.01	0.50	0.00	1.50	1.00	-7.50	-14.50	-12.00
	Forest	-22.00	-16.00	-15.50	-14.50	-7.00	0.00	-1.00	0.50	0.00	-7.50	-14.50	-11.00
	Difference	-0.59	-0.05	0.50	0.50	0.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-1.00
3_HIGH	Open	-24.00	-16.00	-16.50	-14.50	-7.55	0.00	-1.00	0.00	0.50	-8.00	-15.00	-11.00
	Forest	-22.50	-16.50	-14.55	-14.50	-7.00	0.00	-1.00	0.50	0.00	-7.50	-14.50	-10.50
	Difference	-1.50	0.50	-1.95	0.00	-0.55	0.00	0.00	-0.50	0.50	-0.50	-0.50	-0.50

A3 - Temperatur Tagesspanne (Diurnal Range)

Bewölkte Tage

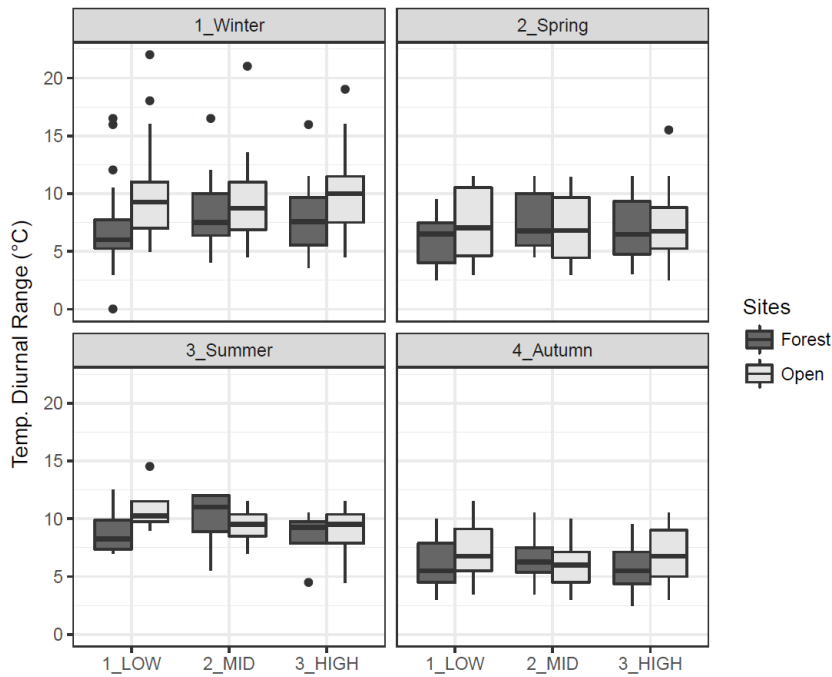


Abbildung 14 Temperaturtagesspanne (°C) für bewölkte Tage (Differenz zwischen Tagesmaximum und Tagesminimum), pro Jahreszeit und Höhenstufe ('LOW': 1840-1940; 'MID': 1990-2090; 'HIGH' 2140-2240).

Sonnige Tage

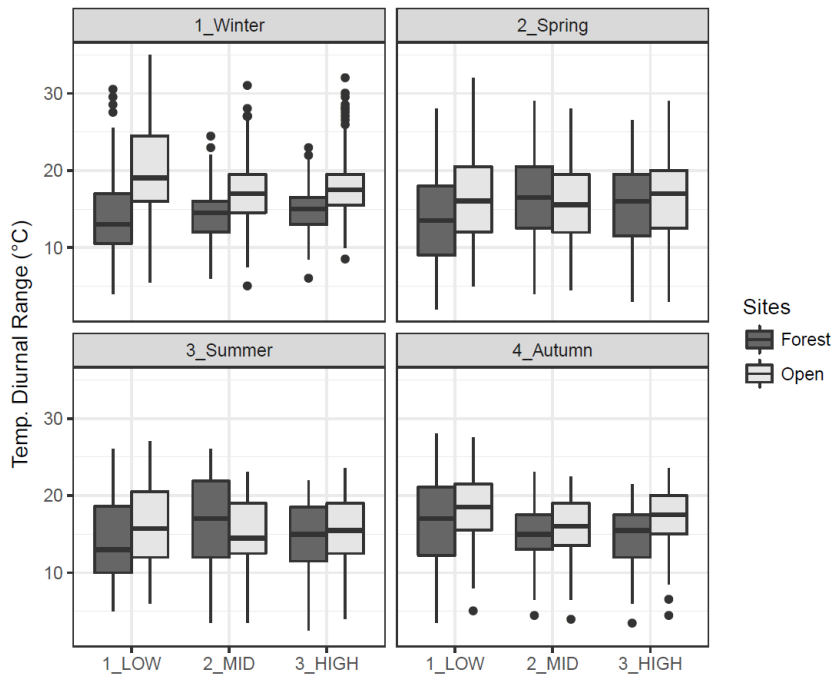


Abbildung 15 Temperaturtagesspanne (°C) für sonnige Tage (Differenz zwischen Tagesmaximum und Tagesminimum), pro Jahreszeit und Höhenstufe ('LOW': 1840-1940; 'MID': 1990-2090; 'HIGH' 2140-2240).

A4 - Temperaturunterschiede Höhenlagen (monatliche Auflösung)

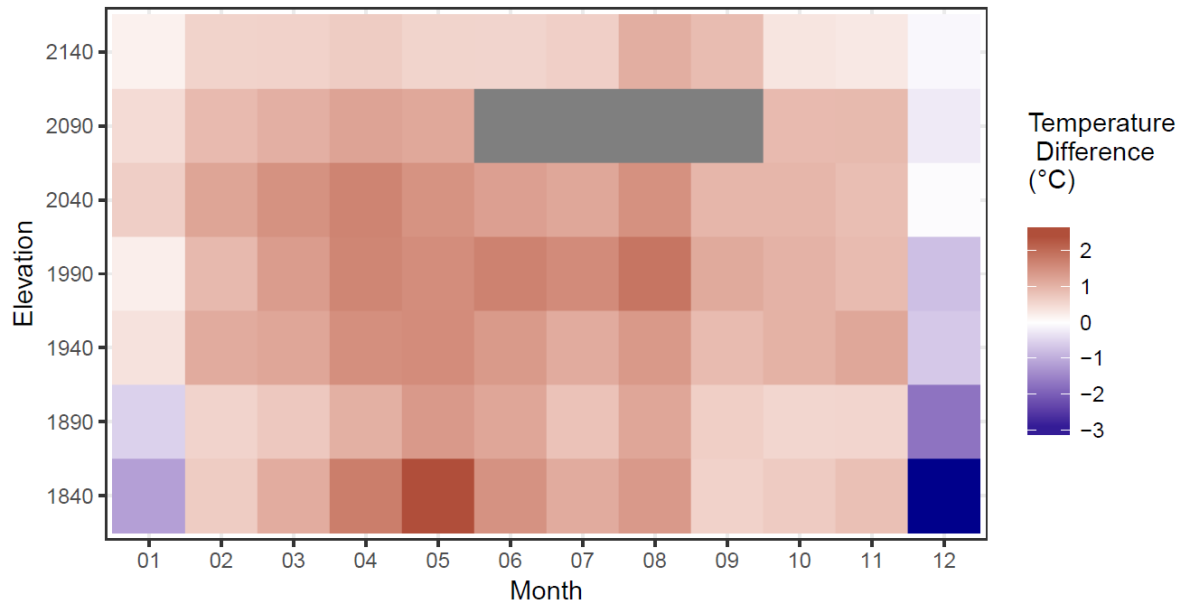


Abbildung 16 Temperaturdifferenz (relativ zur Temperatur auf 2190m Höhe) für jeweilige Höhenstufen und Monate für die Brandfläche

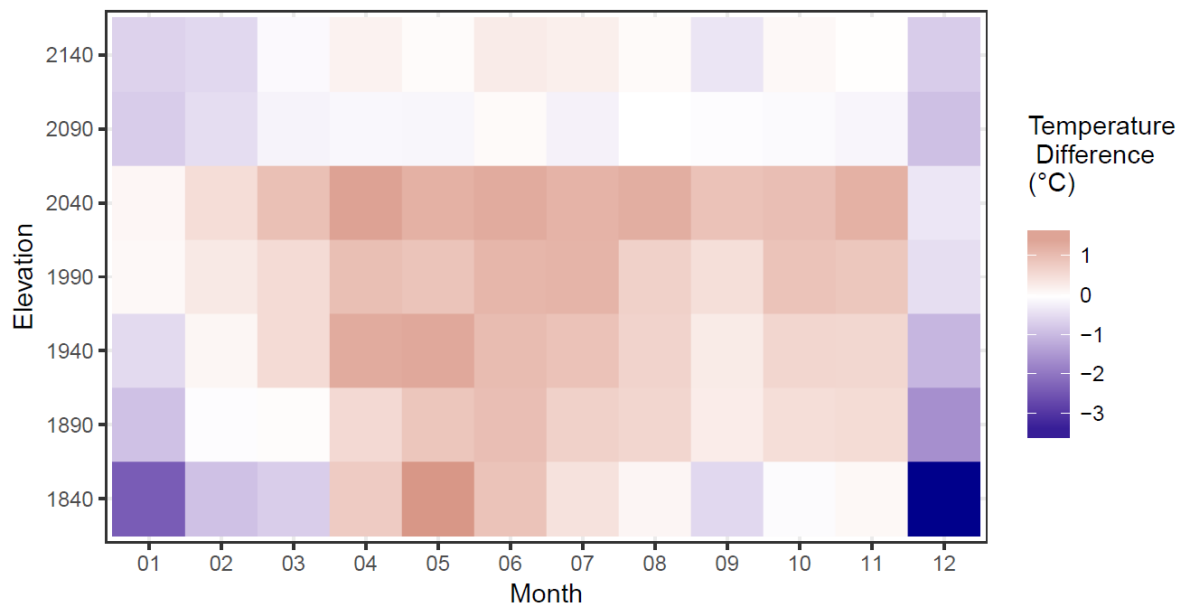


Abbildung 17 Temperaturdifferenz (relativ zur Temperatur auf 2190m Höhe) für jeweilige Höhenstufen und Monate für den angrenzenden Wald

A5 - Strahlungsdaten

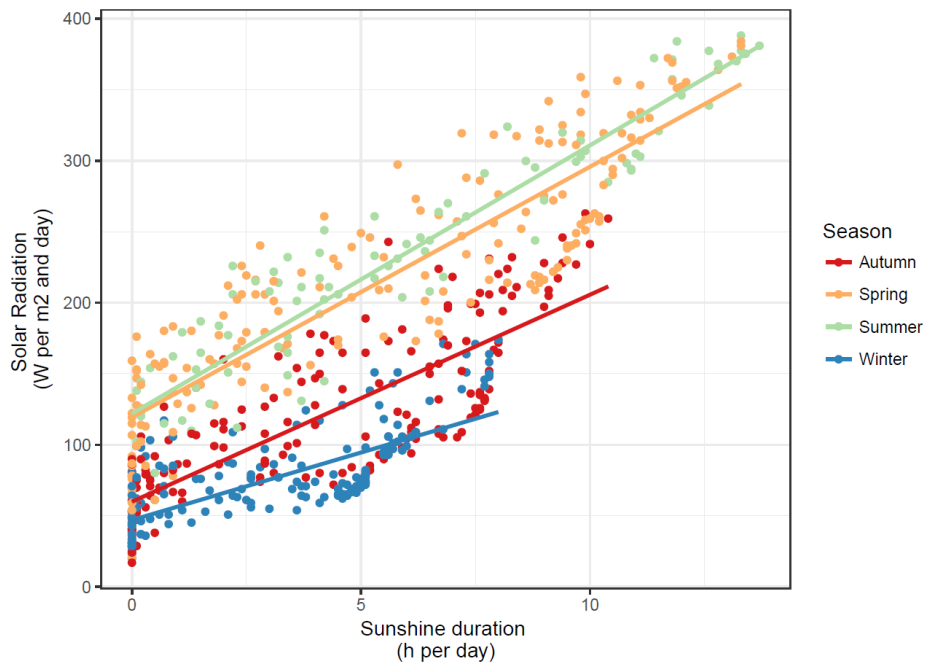


Abbildung 18 Sonneneinstrahlung ($W m^{-2}$ pro Tag) in Abhängigkeit von der Tageslänge. Daten: Klimastation Buffalora

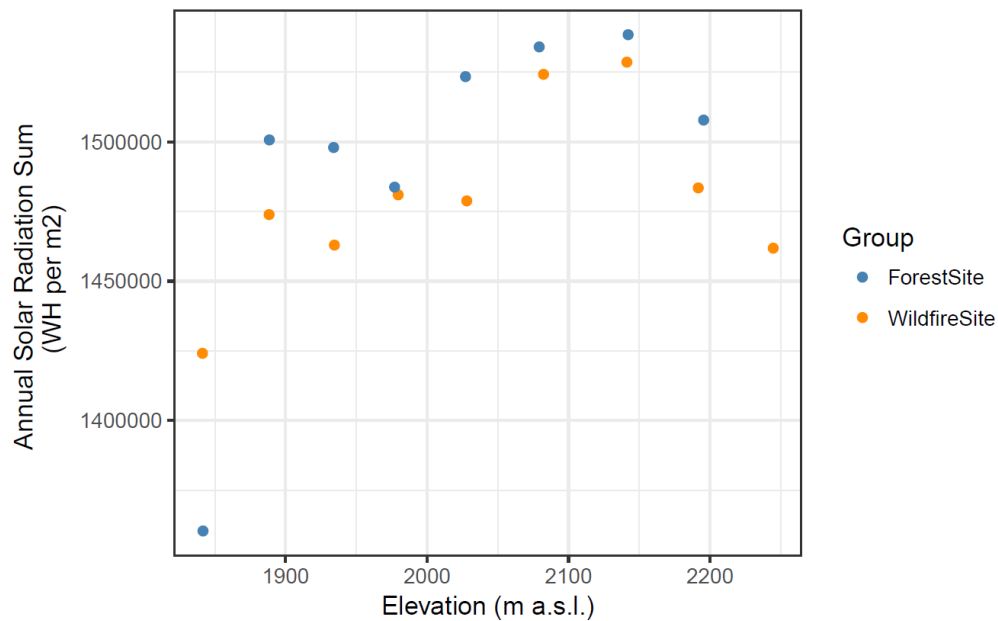


Abbildung 19 Jährliche Sonneneinstrahlung an den Positionen der Temperaturlogger in Wald und Brandfläche, basierend auf der lokalen Topographie (modelliert mit dem ArcGIS Spatial Analyst Tool 'Area solar radiation' auf Basis des Höhenmodells mit 2m Auflösung. Es ist anzumerken, dass die angegebenen Strahlungswerte die Beschattung durch den Wald nicht berücksichtigen).

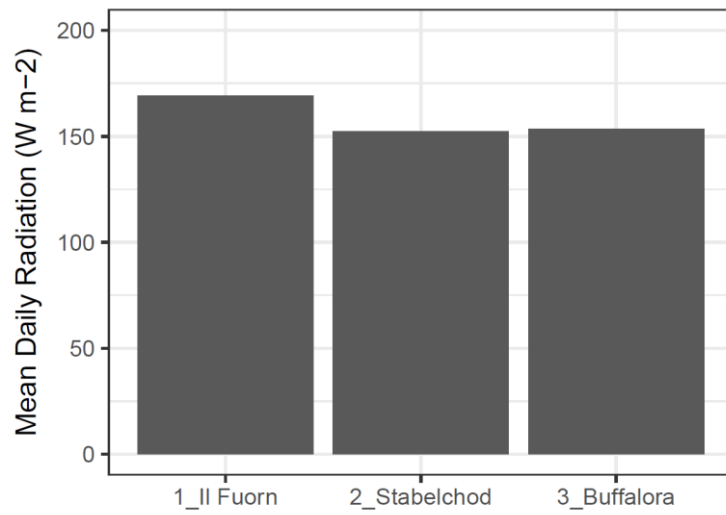


Abbildung 20 Mittlere Strahlungssumme (W m⁻² pro Tag) für die drei Messstandorte (modelliert mit dem ArcGIS Spatial Analyst Tool 'Point solar radiation' auf Basis des Höhenmodells mit 2m Auflösung)

A6 - Relative Luftfeuchtigkeit

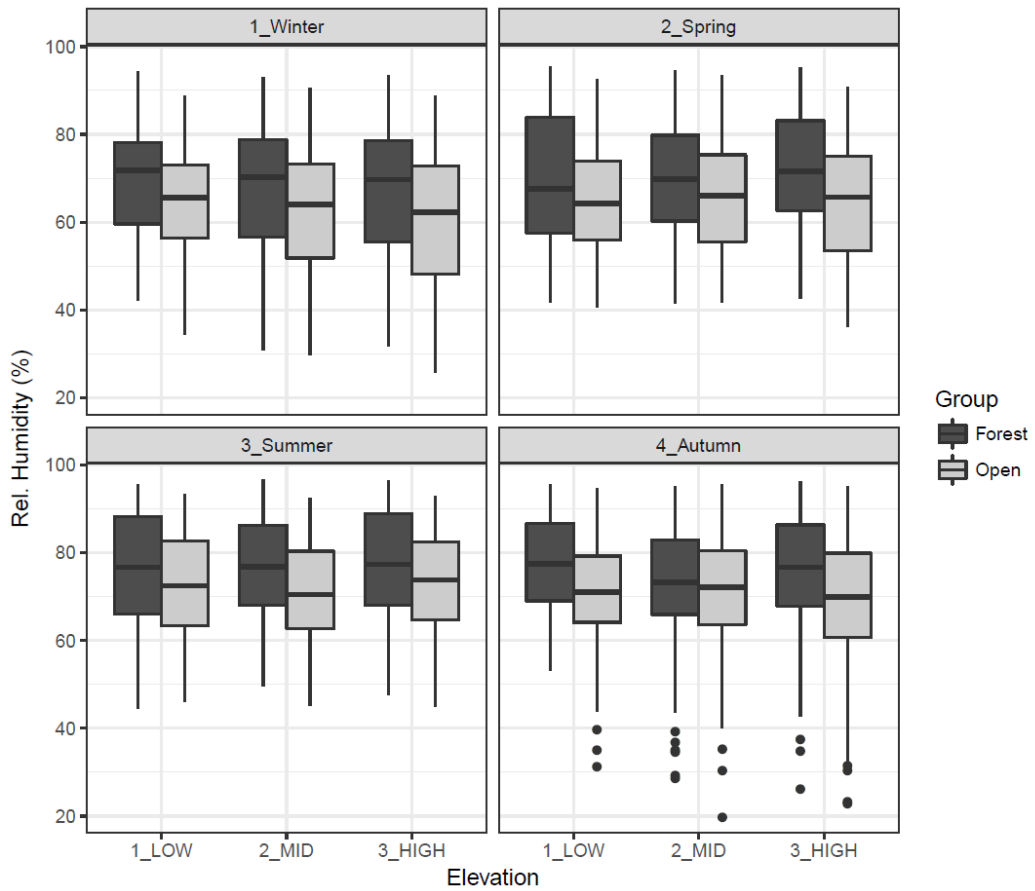


Abbildung 21 Relative Luftfeuchtigkeit (USB Logger) für Brandfläche und angrenzenden Wald für jede Jahreszeit und Höhenstufe ('LOW': 1840-1940; 'MID': 1990-2090; 'HIGH' 2140-2240).