

Trockenheit als limitierender Faktor für den Anwuchs von Fichte und Waldföhre in den alpinen Trockentälern von Rhone und Rhein (TroLiFa)

Schlussbericht

B. Moser & T. Wohlgemuth

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 8903 Birmensdorf



Impressum**Herausgeber**

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Autoren

Moser Barbara, Wohlgemuth Thomas

Mitarbeit

Bachofen Christoph, Baumann Christina, Ding Haiyu, Metslaid Marek, Schnider Evelyne, Schnyder Elvira, Reich Thomas, Walter Annina, Wasem Ulrich

Zitiervorschlag

Moser B., Wohlgemuth T. (2013) Trockenheit als limitierender Faktor für den Anwuchs von Fichte und Waldföhre in den alpinen Trockentälern von Rhone und Rhein (TroLiFa). Schlussbericht zuhanden des Forschungsprogramms Wald und Klimawandel, Eidg. Forschungsanstalt WSL und Bundesamt für Umwelt, und des Amts für Wald, Kanton Graubünden. 21 S.

Titelfotos

Tamins-1 (oben links), Bonaduz (oben rechts), Tamins-2 (unten links), Versuchsdetails (Bilder U. Wasem)

Inhalt

Zusammenfassung	4
1 Hintergrund	5
2 Fragestellung	6
3 Methoden	7
3.1 Provenienzen und Saatgut	7
3.2 Experimente	8
3.3 Messparameter	10
3.4 Datenauswertung	11
4 Resultate	12
4.1 Bodenfeuchtigkeit	12
4.2 Keimung und Mortalität	13
4.3 Wachstum	16
4.4 Reservestoffe	17
4.5 Aufwuchshilfen	19
5 Diskussion	20
5.1 Räumliche und zeitliche Variabilität	20
5.2 Nicht heimische Provenienzen	21
Literatur	23

Zusammenfassung

Das Projekt Trolifa untersuchte die Plastizität verschiedener europäischer Waldföhren- und Fichtenprovenienzen bezüglich Trockenheit in der Jugendphase und prüfte Strategien, die eine natürliche Verjüngung in Tieflagenwäldern der inneralpinen Trockentäler auch unter einem sich ändernden Klima begünstigen. Die experimentell getesteten Strategien umfassten (i) passive Anpassung durch das Überleben resistenter Individuen, (ii) aktive Anpassung durch das Einbringen trockenresistenter Herkünfte von heute bestandesbildenden Baumarten aus europäischen Gebieten mit kontinentalem Klima. Die Plastizität verschiedener Waldföhren- und Fichtenprovenienzen wurde in Bestandeslücken an drei edaphisch unterschiedlichen Standorten im Churer Rheintal getestet. Mit Hilfe von Regenreduktionsdächern sollte innerhalb der Standorte ein künstlicher Bodenfeuchtigkeitsgradient erzeugt werden. Die Bodenfeuchtigkeit variierte jedoch kleinstandörtlich so stark, dass der Einfluss der lokalen Niederschlagsreduktion nicht messbar war. Im April 2010 und 2011 wurden an jedem Standort auf jeweils 15 Saatflächen Waldföhren- und Fichtensamen von 5 bzw. 4 Herkünften ausgesät. In den folgenden zwei Jahren wurden Keimung, Überleben und Wachstum der Sämlinge gemessen. Nach insgesamt drei Vegetationsperioden können folgende Resultate festgehalten werden: (1) Nach einem überdurchschnittlich nassen Sommerhalbjahr 2010 folgte ein sehr trockener Winter 2010/11 mit anschliessender Frühjahrstrockenheit bis Mitte Mai 2011. Diese Unterschiede in der Witterung prägten den Verjüngungserfolg im ersten Jahr nach der Keimung mehr als alle anderen Faktoren. (2) Die Auswirkungen der edaphischen Gegebenheiten auf Überlebensrate und Wachstumsleistung der Sämlinge sind ebenfalls beträchtlich. Im trockenen 2011 überlebten die Keimlinge nur am Standort mit der grössten Wasserspeicherkapazität in angemessener Zahl. Am selben Standort hatten die im feuchten 2010 gekeimten Sämlinge nach zwei Vegetationsperioden bis zu 3-mal mehr Biomasse akkumuliert als an den übrigen Standorten. (3) Die Keimlinge/Sämlinge der verschiedenen Samenherkünfte unterschieden sich weder bezüglich Überlebensrate noch Wachstumsleistung. (4) Begleitende Massnahmen in Form eines Aufwuchsschutzes reduzierten zwar die durch Mäuse verursachte Mortalität jedoch nicht den trockenheitsbedingten Ausfall.

1 Hintergrund

Es wird allgemein anerkannt, dass sich die Erdatmosphäre in den nächsten 50–100 Jahren um 4 bis 7 °C erwärmen wird (IPCC 2007, CH2011 2011). Hitzewellen wie jene von 2003 könnten im Rahmen dieser Prognosen in wenigen Jahrzehnten zur Normalität werden (Schär et al. 2004). Für die Vegetation wird die wohl wichtigste Folge eines Temperaturanstiegs dieses Ausmasses vermehrte Trockenheit sein, da höhere Temperaturen selbst bei gleich bleibenden Niederschlägen zu stärkerer Verdunstung führen. In den Trockentälern der Alpen werfen die aktuellen Zukunftsszenarien unweigerlich die Frage auf, ob die Wälder vermehrte Trockenheit ertragen, und wie insbesondere die für Schutzwälder in tieferen Lagen wichtige Waldföhre (*Pinus sylvestris* L.) mit vermehrten Trockenperioden zurechtkommen wird. Vegetationsmodelle deuten darauf hin, dass bei einem Temperaturanstieg von 4 bzw. 6 °C (IPCC-Szenarien B2 und A1) an den trockensten Orten in der Schweiz keine Wälder mit einheimischen Baumarten mehr wachsen (Zimmermann et al. 2006), oder dass Wälder an solchen Orten künftig nur noch wenig Biomasse aufweisen und damit ihre Schutzwirkung nicht mehr erfüllen können (Rigling et al. 2012).

Die grossräumige Verbreitung bestandesbildender Baumarten ist in erster Linie klimatisch bedingt (Holdridge 1947), kleinräumig spielen aber auch edaphische Verhältnisse, Störungsfrequenz und interspezifische Konkurrenz eine wichtige Rolle. Sogenannte Klimahüllenmodelle sagen voraus, dass sich die potentiellen Wuchsgebiete von Waldarten mit der Klimaerwärmung verschieben werden (Zimmermann et al. 2006). Im Gegensatz zu verschiedenen Tiergruppen (Hickling et al. 2006) und Gebirgspflanzen (z.B. Walther et al. 2005) ist es jedoch schwierig, solche Veränderungen bei Bäumen bereits heute nachzuweisen, da Baumindividuen sehr langlebig sind und sich selbst nach mehreren klimatischen Extremereignissen wieder erholen können (Rennenberg et al. 2006). Andererseits wurde in den französischen Alpen festgestellt, dass Keimlinge und Jungbäume zahlreicher Baumarten bereits heute in höheren Lagen vorkommen als ihre adulten Artgenossen (Lenoir et al. 2009). Es wird aber auch argumentiert, dass der erhöhte CO₂-Gehalt in der Atmosphäre die physiologischen Folgen eines Temperaturanstiegs weitgehend ausgleichen könnte und sich die Baumartenareale nicht in dem Masse verschieben werden, wie es die Klimahüllenmodelle vorausagen (Maracchi et al. 2005, Leuzinger and Körner 2007, Xu et al. 2007, Leuzinger et al. 2011). Andere Autoren gehen davon aus, dass insbesondere die Kombination von Klimaerwärmung und Störungen zu drastischen Änderungen in der Baumartenzusammensetzung führen wird (Chapin et al. 1987, Moser et al. 2010). Dies ist umso bedeutender, als erwartet wird, dass Windwürfe und Waldbrände als indirekte Folge der weltweit steigenden Temperaturen häufiger stattfinden werden (Wohlgemuth et al. 2008, Usbeck et al. 2010).

Trockenheit kann alle Lebensphasen eines Baumes beeinflussen, wobei sie in der Adultphase primär die Wuchsleistung beeinträchtigt (Rennenberg et al. 2006) und nur in Extremfällen zu Mortalität führt (Bigler et al. 2006). Für Keimung und Etablierung hingegen kann bereits vorübergehender Trockenstress eine entscheidende Rolle spielen, da Keimlinge und wenige Jahre alte Bäume (Recklinge) infolge des noch wenig ausgebildeten Wurzelsystems Trockenheit nicht lange überdauern können. In bereits heute trockenen Regionen könnten daher selbst geringe klimatische Änderungen zu grossen Ausfällen bei der Verjüngung führen (Peñuelas et al. 2007, Moser et al. 2010). Angesichts von zunehmend trockeneren Vegetationszeiten (CH2011 2011) erachten wir die Verjüngung

an flachgründigen, sonnenexponierten Orten sowie in grossen Waldblößen in Zukunft als besondere Herausforderung für die Forstwirtschaft. Untersuchungen zur klimabedingten Mortalität der heute bestandesbildenden Baumarten in der Jugendphase sind deshalb unerlässlich, um die Auswirkungen der prognostizierten klimatischen Änderungen auf unsere Wälder abschätzen und die Frage nach einem an den Klimawandel angepassten Baumarten-Portfolio beantworten zu können.

2 Fragestellung

Die Praxis ist heute vor schwerwiegende Entscheide gestellt. Gefragt ist Wissen über die Klimaresistenz bzw. vor allem Trockenheitsresistenz verschiedener Baumarten. Adaptationsstrategien sind nötig, um Schutzfunktionen bei längerfristig änderndem Klima zu garantieren. Für die Anpassung unserer Wälder an ein wärmeres Klima sind verschiedene Strategien denkbar: Passive Anpassung durch das Überleben resistenter Individuen, aktive Anpassung über das Einbringen resistenter Provenienzen von heute bestandesbildenden Baumarten oder die Förderung von neuen, nicht heimischen Baumarten, die mehr Trockenheit ertragen. Je nach Resistenz/Plastizität der heutigen Arten und dem Ausmass der zu erwartenden klimatischen Änderungen können verschiedene Adaptationsstrategien im Vordergrund stehen. Diskussionen mit Forstpraktikern weisen jedoch darauf hin, dass der Erhaltung der heimischen Baumarten erste Priorität zukommt, während der Einsatz exotischer Arten eher skeptisch betrachtet wird (Workshop „Wald und Klimaänderung“ des Schweizerischen Forstvereins, 26.–27. Juni 2008 in Susten, VS; Gespräche mit den Forstbehörden des Kantons Graubünden).

Im vorliegenden Projekt stand die Frage der Plastizität verschiedener europäischer Waldföhren-, Fichten- und Tannenprovenienzen bezüglich Trockenheit in der Jugendphase im Vordergrund. Die Plastizität wurde experimentell mit Hilfe von künstlich generierten Niederschlagsgradienten und an edaphisch unterschiedlichen Standorten getestet. Folgende Fragen wurden gestellt:

- (1) Wie wirken sich unterschiedliche Trockenheitsgrade (100%, 66% und 33% Niederschlag) während der Vegetationszeit auf Mortalität und Wachstumsleistung von Keimlingen und Recklingen aus?
- (2) Gibt es europäische Waldföhren-, Fichten- und/oder Tannenprovenienzen, die länger dauernde Trockenheit besser ertragen als lokale Provenienzen aus Rhone- oder Rheintal?
- (3) In welchem Ausmass beeinflussen edaphische Gegebenheiten die Resistenz von Keimlingen und Recklingen gegenüber Trockenheit?
- (4) Kann der Anwuchserfolg lokaler Provenienzen durch begleitende Massnahmen wie Aufwucherschutz entscheidend erhöht werden?

3 Methoden

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde die Trockenresistenz von Waldföhren-, Fichten- und Tannenkeimlingen im Churer Rheintal unter möglichst natürlichen Umweltbedingungen an vier edaphisch unterschiedlichen Waldstandorten getestet. Ursprünglich beinhaltete das Experiment auch Buchen und Eichen. Mäuse behinderten deren Anwuchs jedoch so stark (Samen- und Keimlingsprädation), dass bezüglich dieser zwei Laubbaumarten keine statistisch gesicherten Auswertungen möglich waren.

3.1 Provenienzen und Saatgut

Trockenresistenz und Plastizität der lokalen Waldföhren-, Fichten- und Tannenprovenienzen aus den alpinen Trockentälern von Rhone und Rhein wurden mit Provenienzen aus Österreich, Rumänien und der Ukraine verglichen (Waldföhre und Fichte s. Tabelle 1; die Tannenprovenienzen stammten aus denselben Regionen wie die Fichte). Die Schweizer Herkünfte stammen nicht von anerkannten Samenerntebeständen sondern von autochthonen Beständen an möglichst trockenen und tief gelegenen Standorten. Die Vergleichsprovenienzen wurden entlang dem europäischen Kontinentalgradienten von West nach Ost ausgewählt, wobei die Herkunftsorte zwischen dem 44. und 49. Breitengrad liegen, um die Variation der für das Wachstum bedeutenden Photoperiodizität (z. Bsp. Heide 1974, Smitspinks et al. 1985, Partanen and Beuker 1999, Partanen 2004) möglichst klein zu halten. Die wichtigsten Klimaparameter der Herkunftsorte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Im Winter 2009/2010 wurden Zapfen von jeweils fünf Bäumen geerntet. Das Saatgut wurde an der WSL aufbereitet. Vor der Aussaat wurden die Samen der fünf beernteten Bäume pro Art und Herkunft jeweils zu gleichen teilen gemischt. Die Fichten- und Tannensamen aus Transsylvanien (RO) wurden beim lokalen Forstdienst erworben und wurden nicht nach Einzelbäumen geerntet.

Tabelle 1. Herkunft und Qualität der verwendeten Waldföhren- und Fichtenprovenienzen entlang des Kontinentalgradienten zwischen West- und Osteuropa. Das Keimprozent des Saatguts wurde anhand von 200 Samen pro Provenienz bestimmt, die während 21 Tagen bei 25 °C/13 °C (Tag/Nacht) auf feuchtem Filterpapier inkubiert worden waren.

Provenienz	Land	Höhe (m ü. M.)	Längengrad	Breitengrad	Samenernte (Jahr/Monat)	Keimprozent	
						2010	2011
<i>Waldföhre (Pinus sylvestris L.)</i>							
VS Rhonetal ¹	Schweiz	560	7°36'45.44"	46°18'48.51"	2009/12	96	98
GR Rheintal ²	Schweiz	570	9°28'51.14"	46°51'04.68"	2009/12	97	96
AT Tirol	Österreich	710	10°42'05.40"	47°12'56.52"	2010/01	95	92
RO Transsylvanien	Rumänien	120	22°05'78.58"	47°15'70.92"	2010/01	42	31
UA Karpaten	Ukraine	420	24°17'01.00"	48°51'20.00"	2010/01	99	95
<i>Fichte (Picea abies (L.) H. Karst.)</i>							
VS Rhonetal ³	Schweiz	620	7°36'32.67"	46°17'44.47"	2009/12	78	53
GR Rheintal ⁴	Schweiz	670	9°22'59.54"	46°49'01.40"	2009/12	49	53
AT Wien	Österreich	800	15°58'64.82"	47°48'44.10"	2009/12	61	62
RO Transsylvanien	Rumänien	600	24°46'03.80"	45°14'95.08"	2010/01	83	64

¹ Pfywald (VS) ² Felsberg (GR) ³ Pfywald (VS) ⁴ Bonaduz (GR)

Tabelle 2. Klimatische Verhältnisse in den Herkunftsgebieten. NS: Mittlere jährliche Niederschlagssumme; WD: Monate mit Wasserdefizit (Niederschlag - potentielle Evapotranspiration ≤ -10 mm); T_{Jan} , T_{Jul} : mittlere Januar- bzw. Julitemperatur. Daten der jeweils nächstgelegenen verfügbaren Wetterstation.

Provenienz	Station	Höhe (m ü. M.)	NS (mm)	WD	T_{Jan} (°C)	T_{Jul} (°C)
VS Rhonetal	Sion ¹	480	598	Apr – Sep	-0,8	19,1
GR Rheintal	Chur ¹	555	798	Mai – Jul	-0,1	17,7
AT Tirol	Imst ²	910	789	Mai	-2,8	16,6
AT Wien	Wiener Neustadt ²	270	599	Mai – Sep	-0,8	19,7
RO Transsylvanien	Deva ³	190	578	Mai – Sep	-2,8	21,4
UA Karpaten	Khmelnitskiy ⁴	195	642	Apr – Okt	-6,4	18,3

¹ 1961–1990; Meteoschweiz

² 1971–2000; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien (www.zamg.ac.at)

³ 1944–1994 (NS) / 1963–1994 (T); Universidad Complutense de Madrid (<http://www.ucm.es/info/cif>)

⁴ 1984–1994; Universidad Complutense de Madrid, (<http://www.ucm.es/info/cif>)

3.2 Experimente

Da bei der natürlichen Verjüngung die Standortverhältnisse eine bedeutende Rolle spielen, wurden die Experimente an vier verschiedenen Versuchsstandorten mit unterschiedlich tiefgründigen Böden durchgeführt (Bonaduz, Ems, Tamins-1 und Tamins-2). Auf diese Weise sollte der Nutzen für die Praxis und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebiete erhöht werden. Um gleiche Strahlungsverhältnisse für alle Versuchspflanzen zu garantieren, wurden die Experimente auf Kahlflächen (min. 30 m x 30 m) durchgeführt, die gezielt zu diesem Zweck geschlagen wurden. Einheitliche Strahlungsverhältnisse sind essentiell, da Interaktionen mit den Niederschlagsbehandlungen die gewünschten Aussagen bezüglich Trockenresistenz verwischen können. Nach der Rodung wurden an jedem Versuchsstandort 15 Saatflächen von 0,5 m x 0,5 m ausgeschieden, auf denen die Grasnarbe entfernt und die obersten 10 cm des Bodens durch Sieben homogenisiert wurde. Jede Saatfläche wurde mit einem Regendach von 1,5 m x 1,5 m abgedeckt, wobei jedes Dach aus 16 Plexiglas-Rinnen mit V-Profil besteht, die 66% der Dachfläche bedecken (Abb. 1a). Je nach gewünschter Niederschlagsreduktion zeigen 0, 8 oder 16 Rinnen nach oben, was theoretisch zur Drainage von 0%, 33% bzw. 66% der aktuellen Niederschlagsmenge führt (Abb. 1b). Da alle Dächer die gleiche Anzahl Rinnen aufweisen, wird gewährleistet, dass unabhängig von der Niederschlagsreduktion auf allen Saatplätzen die gleichen Licht- und Temperaturverhältnisse herrschen. Um die Auswirkungen der Regendächer auf die Bodenfeuchtigkeit zu kontrollieren, wurden im Frühling 2010 pro Versuchsstandort jeweils unter 6 Dächern (2 pro Niederschlagsvariante) Wasserpotentialsensoren installiert (MPS-1 Sensoren, Decagon, Pullman, USA). Diese Messungen zeigten, dass die theoretische Regendurchlassmenge im Sommer 2010 nicht mit dem Bodenwasserpotential korrelierte. Deshalb wurde das Messnetz im Frühling 2011 ausgebaut und unter jedem Regendach ein Wasserpotentialsensor sowie pro Standort ein Bodenwassergehaltssensor (EC-5 Sensoren, Decagon, Pullman, USA) installiert. Im Oktober 2011 wurde während einem Monat der Regendurchlass der drei Regendachtypen getestet. Dazu wurde am Standort Ems unter jedem der drei Regendachtypen eine Regenwippe installiert. Während der Testphase gab es 32 h mit mehr als 1 mm Niederschlag (insgesamt 98 mm). In dieser Zeit wurde bei den 100%- und 66%-Dächern ein Durchlass von 59%

bzw. 49% gemessen, bei den 33%-Dächern lag der Durchlass bei 23%. Die Regendächer waren jeweils von April bis Ende Oktober in Betrieb und wurden über Winter abmontiert.

Jede Saatfläche wurde in 25 Quadrate von 10 cm x 10 cm unterteilt (Abb. 1c), wovon 13 zufällig einer Provenienz von Waldföhre, Fichte und Tanne zugeordnet wurden. Pro Quadrat wurden Anfang April 2010 jeweils 25 Samen derselben Art und Provenienz ausgesät (30 bei Provenienzen mit Keimungsraten < 80%). Auf drei weiteren Quadraten wurden jeweils 10 Samen der Rheintaler Waldföhren-, Fichten- bzw. Tannenprovenienz ausgebracht, die anschliessend mit einem Plastikhütchen als Keim- und Aufwuchsschutz abgedeckt wurden (Abb. 13a). Auf den verbleibenden 9 Quadraten, wurden Buchen- und Eichensamen ausgebracht, auf die jedoch mangels Keimerfolg in diesem Bericht nicht weiter eingegangen wird. Im April 2011 wurde die Aussaat der Waldföhren- und Fichtenprovenienzen auf den 9 leeren (Buchen- bzw. Eichen-)Quadraten mit je 20 Samen pro Quadrat wiederholt. Da bei der Tanne der grösste Teil der 2010 gekeimten Keimlinge Ende Sommer abgestorben waren, wurden im Herbst 2010 alle Keimlinge geerntet und auf denselben Quadraten im Frühjahr 2011 nochmals Samen ausgesät. Nach der Aussaat wurden die Saatflächen jeweils mit einem Drahtkorb (60 cm x 60 cm x 20 cm) abgedeckt, um Samen- und Keimlingsfrass durch Vögel und Mäuse zu reduzieren. Im ersten Jahr mussten trotzdem viele Mäuseschäden festgestellt werden. Die Saatflächen wurden regelmässig gejätet, um unerwünschte Konkurrenzeffekte durch Kräuter zu vermeiden. Die Aufwuchshilfen wurden nach der ersten Ernte im November 2010 entfernt, da negative Auswirkungen auf das Baumwachstum erwartet wurden.

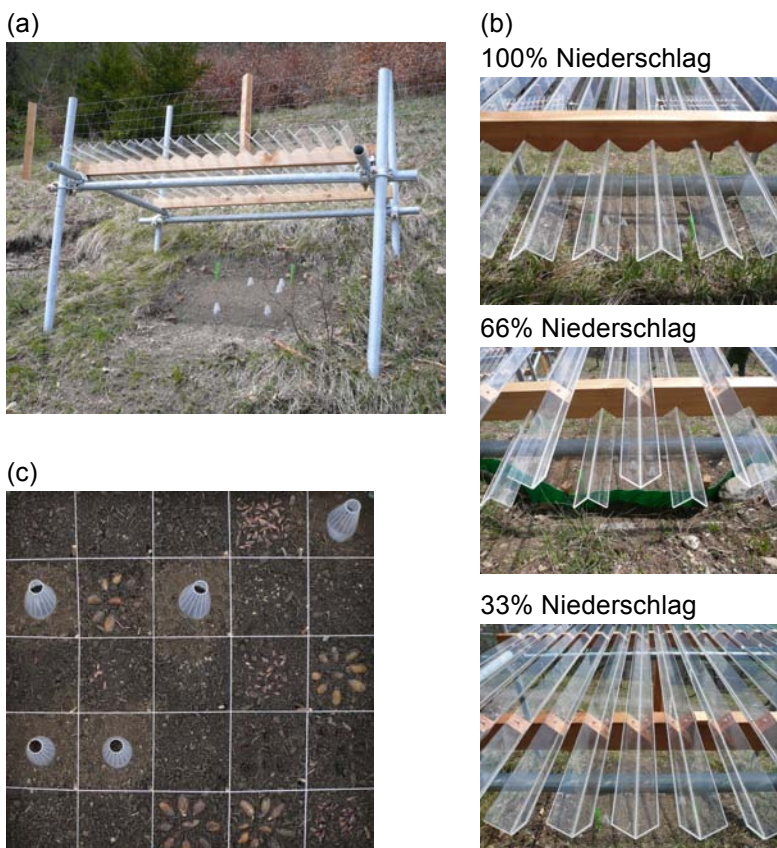


Abb. 1. (a) Regendach (1,5 m x 1,5 m) mit Plexiglasrinnen und dazugehöriger Saatfläche (0,5 m x 0,5 m); (b) Anordnung der Plexiglasrinnen, die je nach Ausrichtung der Profilöffnungen zu unterschiedlichem Regendurchlass führen; (c) Saatfläche mit 25 Saatplätzen (10 cm x 10 cm). Plastikhütchen als Aufwuchshilfen wurden im ersten Jahre getestet. Bilder B. Moser.

3.3 Messparameter

In den ersten vier Monaten nach der Aussaat wurden Keimungsrate und Keimlingsmortalität zweiwöchentlich, später monatlich dokumentiert. Anfang November 2010 wurden in jedem Quadrat 1–5 Keimlinge geerntet, sofern mehr als 10 Keimlinge (5 unter den Aufwuchshilfen) vorhanden waren. Bei den geernteten Keimlingen wurde die Höhe gemessen und anschliessend das Trockengewicht (oberirdische Biomasse) bestimmt. Im Herbst 2011 standen die 2010 ausgesäten Keimlinge so dicht, dass bei der Ernte nur die zwei dicksten Sämlinge stehen gelassen wurden. Bei allen Sämlingen wurden Durchmesser (auf Bodenhöhe) und Höhe gemessen, bei den geernteten wurde zusätzlich das Trockengewicht bestimmt. Nach der Ernte wurden die Sämlinge innerhalb von 3 Stunden in der Mikrowelle denaturiert, um später nicht strukturierte Kohlenhydrate (lösliche Zucker und Stärke; engl.: non structural carbohydrates NSC) messen zu können. Pro Standort und Provenienz wurden je 5 Waldföhrenquadrate entlang einem möglichst breiten Gradienten von Bodenwassergehalt ausgewählt. Der Anteil NSC am Trockengewicht von Nadeln und Stämmchen dieser Proben wurde im Juli 2012 von PD Dr. Günter Hoch am Botanischen Institut der Universität Basel nach einem Standardprotokoll gemessen (Hoch et al. 2002). Die Keimungsrate bei den 2011 ausgesäten Samen war infolge grosser Frühlingstrockenheit gering, deshalb wurde im Herbst 2011 auf eine Ernte verzichtet. Im Herbst 2012 wurden alle Sämlinge geerntet und jeweils bei den zwei dicksten pro Quadrat Durchmesser, Höhe und Trockengewicht (oberirdische Biomasse) gemessen (Abb. 2).



Abb. 2. Ernte und Vermessung der zwei dicksten Sämlinge pro Quadrat im Herbst 2012. Bilder T. Wohlgemuth.

3.4 Datenauswertung

Der theoretische Regendurchlass konnte weder das gemessene Bodenwasserpotential noch die Eigenschaften/Wuchsleistung der Baumkeimlinge erklären. Regressionsanalysen zeigten auch keinen Zusammenhang zwischen Wuchsleistung und Bodenwasserpotential. Basierend auf den Messungen der EC-5 Sensoren wurde deshalb für jeden Standort eine Wasserretentionskurve erstellt, und die Bodenwasserpotentiale (kPa) in Bodenwassergehalt (%) umgerechnet. Da sich der Bodenwassergehalt primär zwischen den Standorten und kaum innerhalb der Standorte unterschied (Abb. 3), wurden die Daten mit Hilfe der Varianzanalyse (ANOVA) ausgewertet. Zur Berechnung der Keimungsrate bzw. der Keimlingsdichte am Ende der ersten Vegetationsperiode wurden die Daten auf-

grund von Anzahl ausgesäter Samen und Keimerfolg unter Laborbedingungen (Tabelle 1) standardisiert, so dass sich die Resultate jeweils auf 100 keimfähige Samen beziehen.

Die Bodenwasserpotentialsensoren am Standort Ems lieferten Resultate, die wir aufgrund unserer Beobachtungen im Feld als unglaubwürdig einstufen. Wir gehen davon aus, dass das Bodenwasserpotential an diesem Standort ausserhalb des Messbereichs der MPS-1 Sensoren liegt (-10 bis -500 kPa; pF 2 bis 3.71). In Folge geringer Keimungsrate und hoher Mortalität waren zudem nur wenige Keimlinge vorhanden. Aufgrund dieser Probleme beziehen sich die vorgestellten Resultate nur auf die Standorte Bonaduz, Tamins-1 und Tamins-2. Geringe Stichprobenzahlen an allen Standorten sind auch der Grund für fehlende Resultate bei der Tanne.

4 Resultate

4.1 Bodenfeuchtigkeit

Die Bodenwasserpotentialmessungen zeigten, dass es während der Vegetationsperiode weder im Mittel noch während Trockenphasen Unterschiede im pflanzenverfügbaren Wasser zwischen den Standorten gab. Innerhalb der Standorte konnte aber eine beträchtliche Variation festgestellt werden. Im Gegensatz dazu war der Bodenwassergehalt an den drei Standorten sehr verschieden (ANOVA: $F_{2,28} = 297,1$, $P < 0,001$; Abb. 3). Zwischen April und September 2012 wurden in Tamins-1 durchschnittlich 36% Bodenwassergehalt gemessen, in Bonaduz 24% und in Tamins-2 11% (2011: 32%, 22% und 10%). Die Anteile von Ton, Schluff und Sand sind an den drei Standorten vergleichbar, während der Skelettanteil in Tamins-2 deutlich höher ist als an den übrigen Standorten (L. Walthert, pers. Mitt.), womit die Wasserspeicherkapazität an diesem Standort geringer sein dürfte. Eine detailliertere Bodencharakterisierung wird im Rahmen von Trolifa+ folgen. Der Effekt der Regendächer auf den Bodenwassergehalt war sowohl im Sommer 2010 wie auch im Sommer 2011 kleiner als die kleinstandörtlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Dächern. Auch nach zwei Vegetationsperioden mit Regenmanipulation konnte kein Einfluss auf den Bodenwassergehalt festgestellt werden (ANOVA: $F_{2,28} = 0,625$, $P > 0,5$).

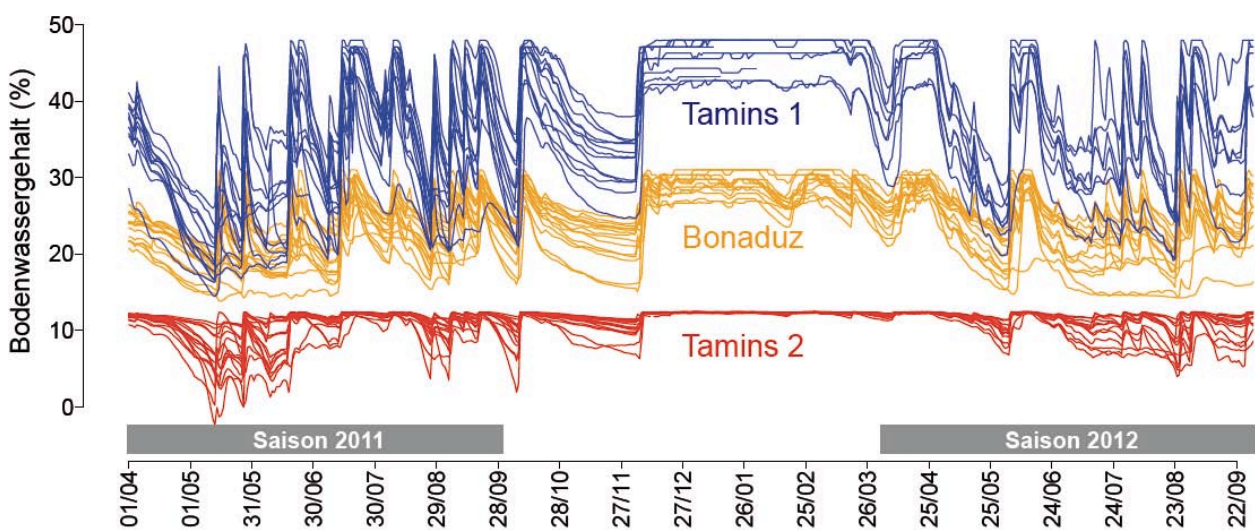


Abb. 3. Bodenwassergehalt 2011–2012 an den Standorten Bonaduz, Tamins-1 und Tamins-2. Die grauen Balken bezeichnen den Zeitraum, in dem die Regendächer installiert waren.

4.2 Keimung und Mortalität

Im Frühjahr 2010 war der Keimungserfolg dank überdurchschnittlich feuchten Bedingungen nach der Aussaat (Abb. 7a) an allen Standorten gut (Abb. 4). Während bei der Waldföhre an allen Standorten mehr als ein Drittel der Samen keimte, war die Fichte am trockensten Standort Tamins-2 etwas weniger erfolgreich (Interaktion Jahr x Art). Ein Jahr später (2011) herrschten vor, während und nach der Aussaat trockene Bedingungen, so dass sich der Einfluss der unterschiedlichen Bodeneigenschaften auf die Keimung bemerkbar machte (Interaktion Jahr x Standort): Während am Standort Tamins-1 immer noch zufriedenstellende Keimungsraten erreicht wurden, nahm der Keimungserfolg in Bonaduz und Tamins-2 deutlich ab (Abb. 4). Bei den standardisierten Keimungsraten konnte kein Unterschied zwischen den Provenienzen festgestellt werden.

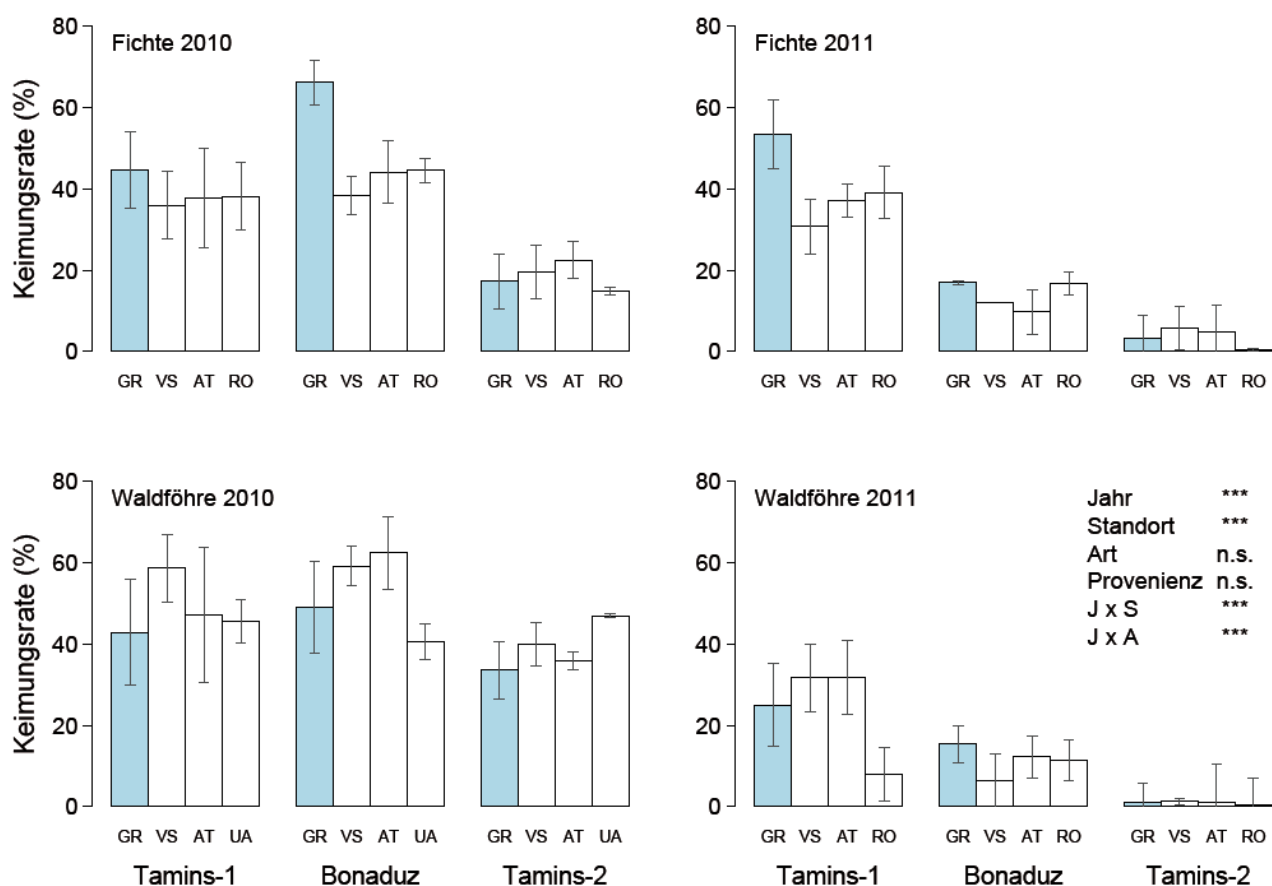


Abb. 4. Standardisierte Keimungsraten von Waldföhren- und Fichtensamen, die in zwei aufeinanderfolgenden Jahren an den Standorten Bonaduz, Tamins-1 und Tamins-2 ausgesät wurden. Unten rechts: ANOVA-Resultate der Hauptfaktoren und sowie signifikanter Interaktionen (* $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$, n.s. nicht signifikant). Blaue Balken: autochthone Provenienz aus dem Rheintal (Abk. s. Tab. 1). Mittlerer Bodenwassergehalt April–September 2011: Tamins-1 32%, Bonaduz 22%, Tamins-2 10%.

Die Keimlingsmortalität war bei der Fichte während der ersten Vegetationsperiode in beiden Jahren deutlich höher als bei der Waldföhre (Abb. 5). Bei der Waldföhre lag sie 2011 trotz guten Witterungsbedingungen während der Sommermonate (Abb. 7b) etwas höher als 2010. Unterschiede zwischen den Standorten konnten nur 2010 festgestellt werden: Bei der Fichte war die Mortalität in

Bonaduz am höchsten, bei der Waldföhre in Tamins-1 am tiefsten (Interaktion Standort x Art). Die Keimlingsmortalität war bei allen Provenienzen gleich gross.

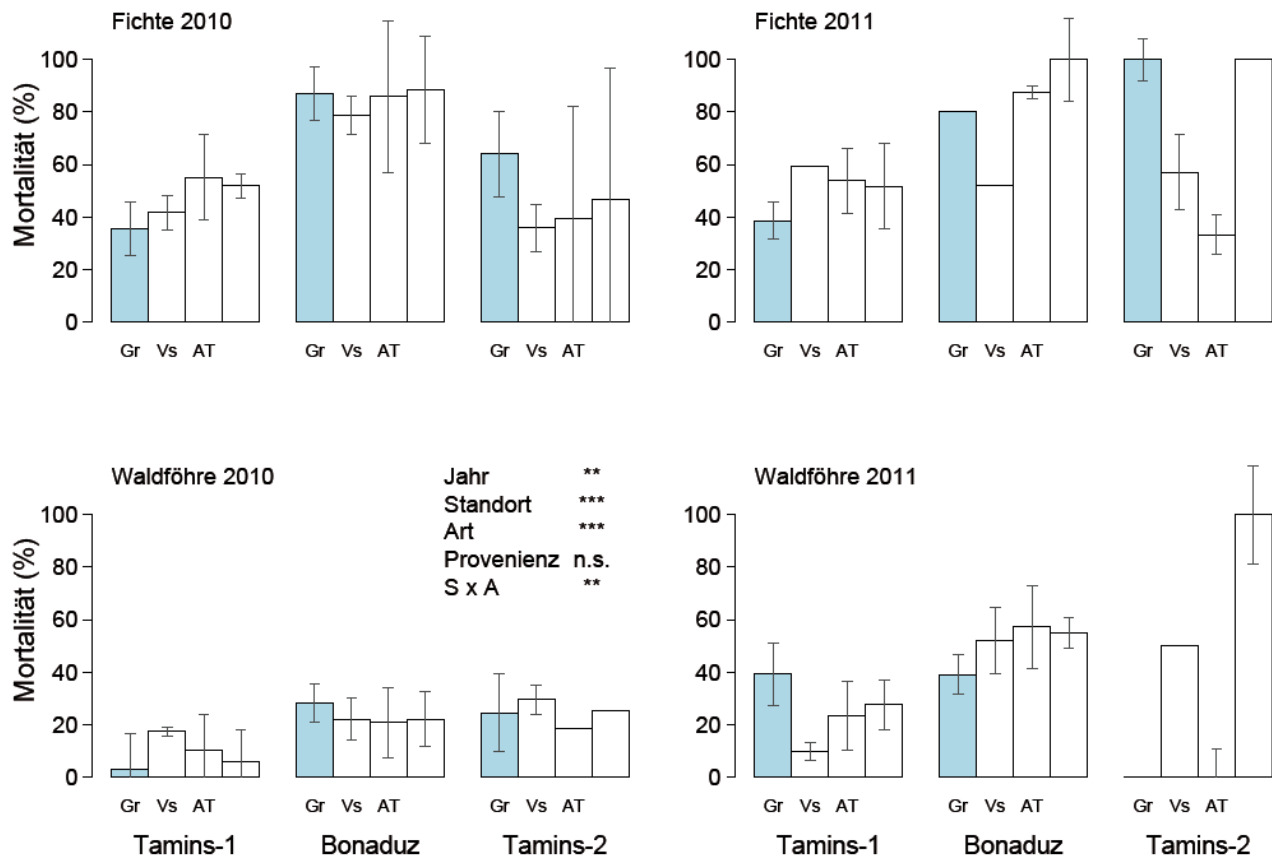


Abb. 5. Mortalität von Waldföhren- und Fichtenkeimlingen während der ersten Vegetationsperiode nach der Aussaat an den Standorten Bonaduz, Tamins-1 und Tamins-2. Unten links: ANOVA-Resultate der Hauptfaktoren und sowie signifikanter Interaktionen (* $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$, n.s. nicht signifikant). Blaue Balken: autochthone Provenienz aus dem Rheintal (Abk. s. Tab. 1). Mittlerer Bodenwassergehalt April–September 2011: Tamins-1 32%, Bonaduz 22%, Tamins-2 10%.

Aus der Kombination von Keimungsrate und Mortalität resultierten am Ende der ersten Vegetationsperiode je nach Witterungsbedingungen, Baumart und Versuchsstandort unterschiedliche Keimlingszahlen (Interaktionen Jahr x Art bzw. Standort x Art). Die überdurchschnittlich guten Niederschlagsverhältnisse im Frühjahr und Sommer 2010 führten dazu, dass im Oktober pro 100 ausgesäte, keimfähige Samen an allen Standorten mehr als 30 Waldföhrenkeimlinge vorhanden waren (Abb. 6). Bei der Fichte war die Mortalität trotz guter Witterung so hoch, dass nur gerade am feuchtesten Standort mehr als 25 Keimlinge die erste Vegetationsperiode überlebten. Der trockene Frühling 2011 behinderte die Keimung stark, wodurch in jenem Jahr bei beiden Arten nur am feuchtesten Standort eine nennenswerte Anzahl Keimlinge aufkommen konnte (Fichte 25, Waldföhre 18 von 100 keimfähigen Samen).

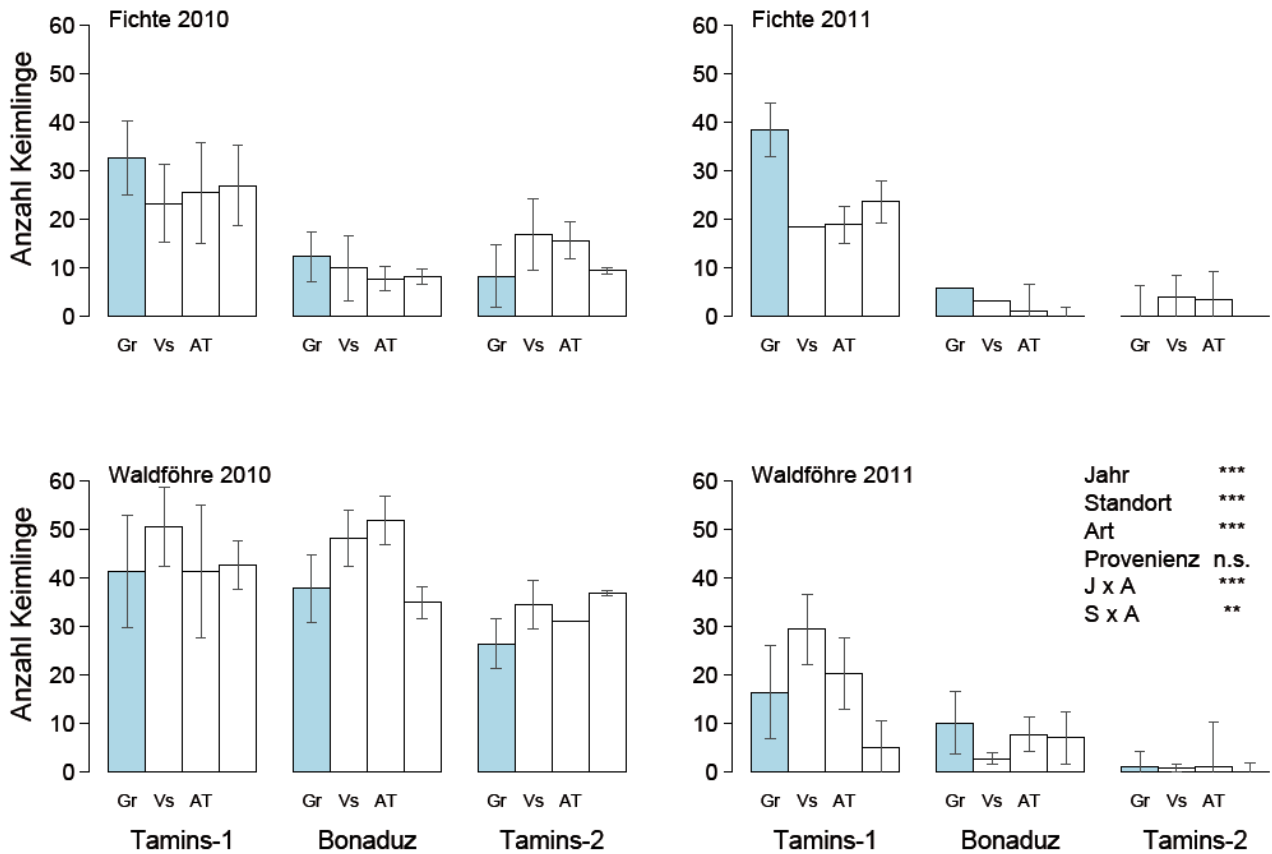
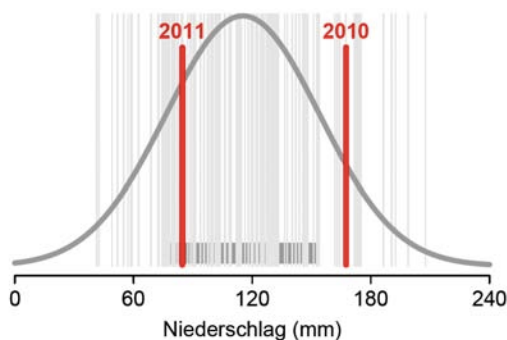


Abb. 6. Anzahl Waldföhren- und Fichtenkeimlinge (pro 100 keimfähige Samen) nach der ersten Vegetationsperiode an den Standorten Bonaduz, Tamins-1 und Tamins-2. Unten rechts: ANOVA-Resultate der Hauptfaktoren und sowie signifikanter Interaktionen (* $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$, n.s. nicht signifikant). Blaue Balken: autochthone Provenienz aus dem Rheintal (Abk. s. Tab. 1). Mittlerer Bodenwassergehalt April–September 2011: Tamins-1 32%, Bonaduz 22%, Tamins-2 10%.

(a) April–Mai



(b) Mai–August

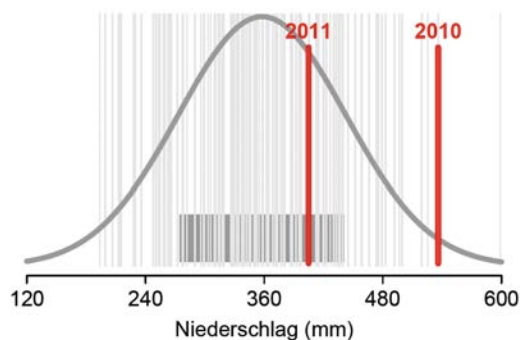


Abb. 7. Jährliche Niederschlagsmenge (mm) in Chur von 1888–2011 (Meteoschweiz) (a) in den zwei Monaten nach der Aussaat und (b) während der Vegetationsperiode. Die grauen Kurven entsprechen einer angepassten Normalverteilung, der graue Balken entlang der x-Achse bezeichnet das 67%-Vertrauensintervall. Die vertikalen Linien zeigen die Niederschlagsmenge eines einzelnen Jahres, wobei die Jahre 2010 und 2011 rot markiert sind.

4.3 Wachstum

Bereits nach der ersten Vegetationsperiode konnten deutliche Wachstumsunterschiede zwischen den Standorten festgestellt werden: Die Waldföhrenkeimlinge hatten am feuchtesten Standort 1,5 mal mehr oberirdische Biomasse produziert als an den trockeneren Standorten (Abb. 8b). Nach drei Jahren betrug die Differenz mehr als das 2-fache (Abb. 8a,b). Ähnliche Grössenunterschiede konnten bei der Baumhöhe festgestellt werden. Innerhalb der einzelnen Provenienzen variierte das Wachstum so stark, dass es in allen Jahren keine signifikanten Unterschiede zwischen den Provenienzen gab (ANOVA 2010: $F_{3,107} = 0,19$, $P > 0,05$; ANOVA 2012: $F_{3,209} = 0,97$, $P > 0,05$; Abb. 8b).

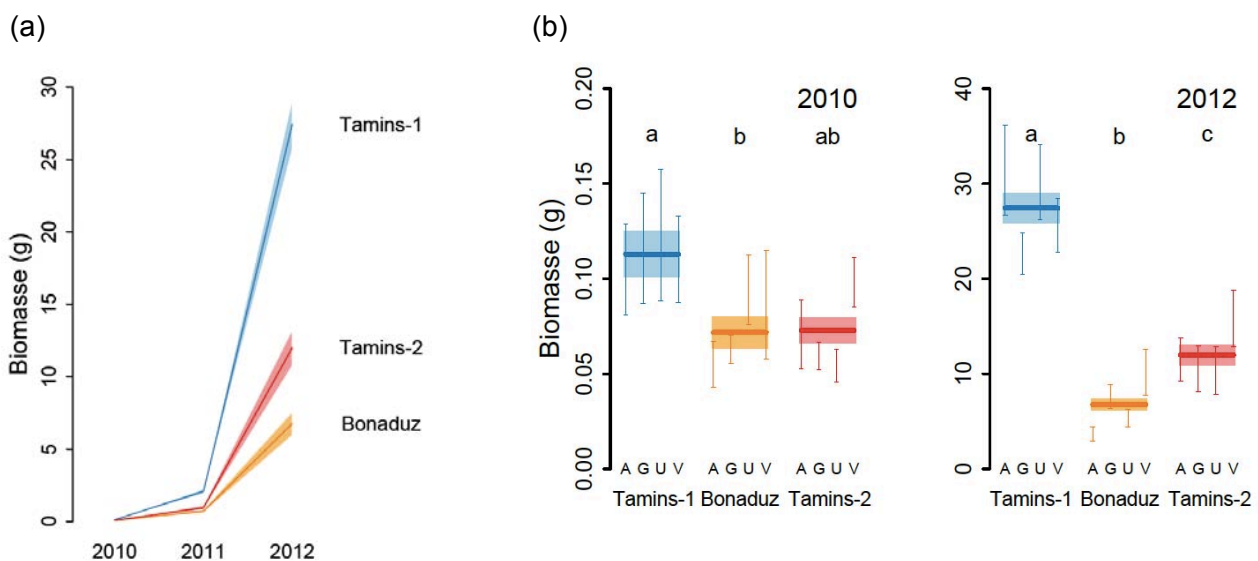


Abb. 8. Oberirdische Biomasse von Waldföhrensämlingen (Aussaat 2010). (a) Biomassenzunahme 1–3 Jahre nach der Aussaat: Mittelwert pro Standort (dunkle Linien) \pm Standardfehler (helle Fläche). (b) Mittlere Biomasse (\pm Standardfehler) 1 und 3 Jahre nach der Aussaat. Die vertikalen Linien bezeichnen die einzelnen Provenienzen (Mittel \pm Standardfehler; angeordnet in der Reihenfolge zunehmender Sommertrockenheit am Herkunftsort; Abk. s. Tab. 1). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen zwei Standorten (ANOVA mit anschliessendem Tukey HSD Test). Mittlerer Bodenwassergehalt April–September 2011: Tamins-1 32%, Bonaduz 22%, Tamins-2 10%.

Wegen hoher Mortalität während der ersten Vegetationsperiode waren im Herbst 2010 bei der Fichte nur wenige Keimlinge für Biomassemessungen vorhanden. Auch in den folgenden Jahren waren die Stichprobenzahlen zu gering, um statistisch gesicherte Aussagen machen zu können. Generell produzierten die Waldföhrensämlinge in den ersten drei Jahren rund 10 mal mehr oberirdische Biomasse als die Fichtensämlinge (Abb. 9,10). Am Ende der Versuchsperiode waren die Fichtensämlinge am feuchtesten Standort rund 3–4 mal grösser als an den übrigen Standorten.

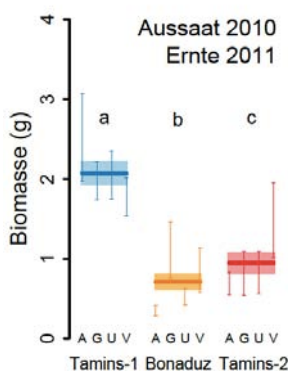
Die schlechten Keimungsbedingungen im Frühjahr 2011 (Abb. 7a) wirkten sich auch längerfristig auf das Sämlingswachstum aus. Ein Vergleich der oberirdischen Biomasse bei 2-jährigen Waldföhren zeigt, dass die 2010 ausgesäten Sämlinge am feuchtesten Standort vier mal so gross waren wie die Sämlinge, die ein Jahr später ausgesät worden waren (Abb. 10a). In Bonaduz und Tamins-2 erreichte der Unterschied Faktor 2 bzw. 3. Während die Waldföhrensämlinge von 2010 am feuch-

testen Standort in den ersten 2 Jahren deutlich mehr oberirdische Biomasse akkumulierten als an den trockenen Standorten, konnte bei den Sämlingen von 2011 kein Unterschied zwischen den Standorten festgestellt werden. Bei der Fichte gab es ähnliche, aber statistisch nicht gesicherte Unterschiede (Abb. 10b).



Abb. 9. Waldföhren- und Fichtensämlinge im Herbst 2012, drei Jahre nach der Aussaat. Bild T. Wohlgemuth.

(a) Waldföhre



(b) Fichte

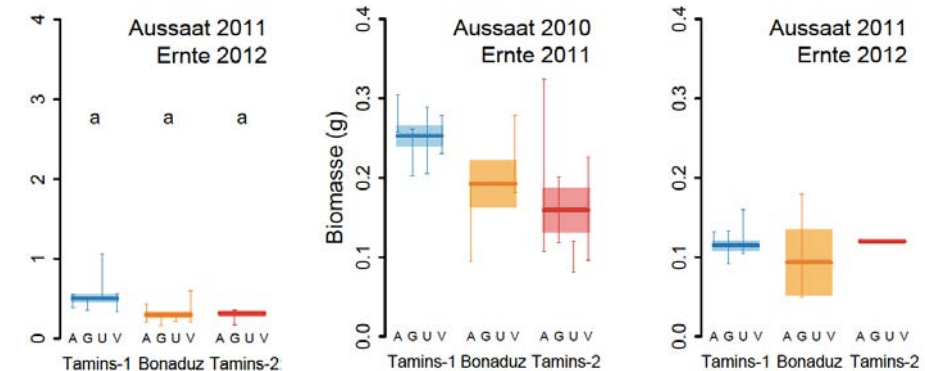


Abb. 10. Oberirdische Biomasse von 2-jährigen (a) Waldföhren- und (b) Fichtensämlingen: Mittelwert (dunkle Linie) \pm Standardfehler (helle Fläche). Die vertikalen Linien bezeichnen die einzelnen Provenienzen (Mittel \pm Standardfehler; angeordnet in der Reihenfolge zunehmender Sommertrockenheit am Herkunftsort; Abk. s. Tab. 1). Provenienzen mit weniger als 2 Sämlingen sind nicht dargestellt. Bei der Waldföhre kennzeichnen unterschiedliche Kleinbuchstaben signifikante Unterschiede zwischen zwei Standorten (ANOVA mit anschliessendem Tukey HSD Test). Mittlerer Bodenwassergehalt April–September 2011: Tamins-1 32%, Bonaduz 22%, Tamins-2 10%.

4.4 Reservestoffe

Bei der Teilstichprobe, die für die Messung von nichtstrukturierten Kohlenhydraten verwendet wurde, konnten ähnliche Wachstumsunterschiede zwischen den Standorten festgestellt werden wie bei der gesamten Stichprobe (Abb. 11a-c): Am Ende der zweiten Vegetationsperiode waren die Waldföhrensämlinge am feuchtesten Standort (durchschnittlich 32% Bodenwassergehalt) doppelt so hoch und 1,5 mal so dick wie die Sämlinge an den Standorten mit 22% resp. 10% Bodenwasser-

gehalt. Im Gegensatz dazu war der Anteil der nichtstrukturierten Kohlenhydrate (NSC) am Trockengewicht von Nadeln und Stämmchen bei 32% bzw. 22% Bodenwassergehalt gleich hoch, während er am trockensten Standort deutlich tiefer lag (Abb. 11d,e). Die Zuckerfraktion (Anteil Zucker an den NSC) war bereits bei 22% Bodenwassergehalt reduziert (Abb. 11f). Das heisst, die Waldföhrensämlinge reduzierten bei mässiger Wasserverfügbarkeit (Bonaduz) zuerst das Wachstum und benötigten erst bei geringem Bodenwassergehalt (Tamins-2) vermehrt Reservestoffe für das Wachstum. Gleichzeitig wurde in Bonaduz ein kleinerer Anteil Zucker eingelagert als am feuchtesten Standort.

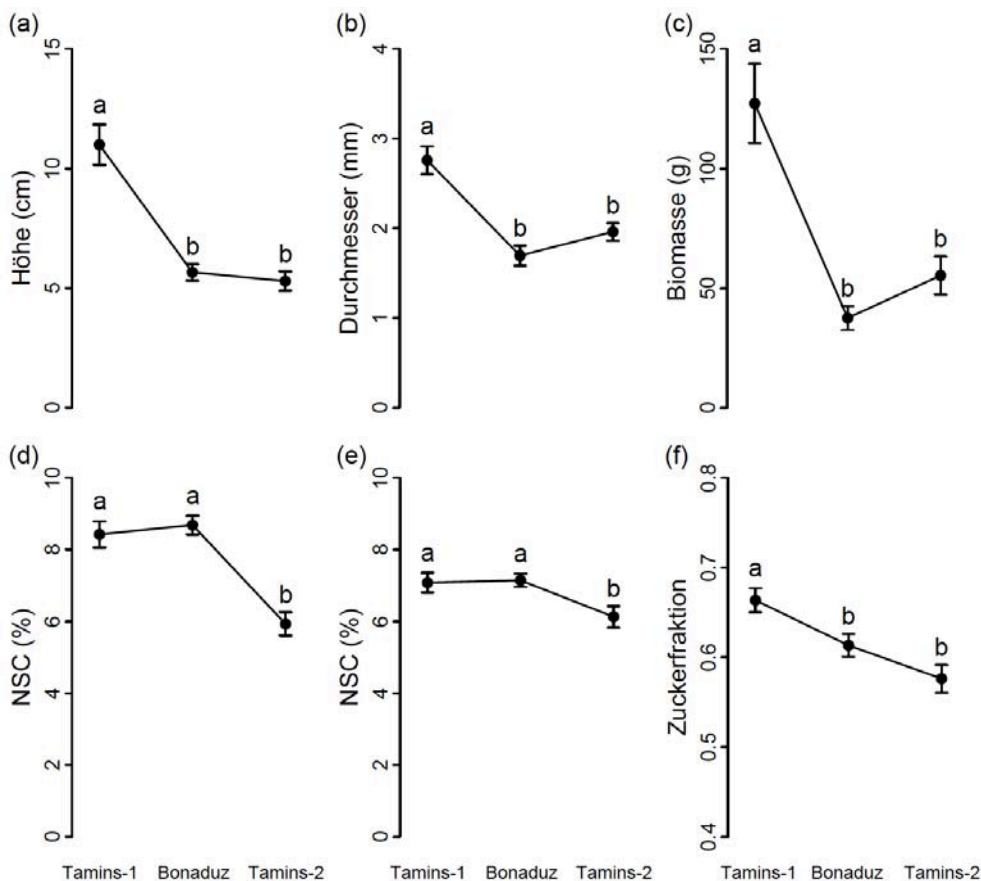


Abb. 11. Wachstum (a: Höhe; b: Stammdurchmesser auf Bodenhöhe; c: oberirdische Biomasse) und Anteil nichtstrukturierter Kohlenhydrate (NSC; d: Nadeln; e: Stamm) am Trockengewicht von 2-jährigen Waldföhrensämlingen an den drei Versuchsstandorten (N=74 Sämlinge). f: Zuckerfraktion (Nadeln und Stamm): Anteil Zucker an den gesamten NSC. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen zwei Messpunkten (ANOVA mit anschliessendem Tukey HSD Test). Mittlerer Bodenwassergehalt April–September 2011: Tamins-1 32%, Bonaduz 22%, Tamins-2 10%.

4.5 Aufwuchshilfen

Die Präsenz eines Aufwuchsschutzes in Form eines Plastikhütchens wirkte sich bei der Fichte negativ auf die Keimung aus, sorgte aber gleichzeitig für eine geringere Mortalität während der ersten Vegetationsperiode. In der Summe glichen sich beide Effekte aus, so dass die Anzahl Keimlinge am Ende der Vegetationsperiode mit und ohne Plastikhütchen etwa gleich gross war (Abb. 12). Die Hütchen hatten auch keinen Einfluss auf die Wuchsleistung der Fichten, weder nach einer noch nach drei Vegetationsperioden (ANOVA 2010: $F_{1,12} = 0,167$, $P > 0,5$; ANOVA 2012: $F_{1,30} = 0,006$, $P > 0,5$).

Bei der Waldföhre war die Keimungsrate am mittelfeuchten Standort in Bonaduz unter den Aufwuchshilfen ebenfalls reduziert. So waren am Ende der ersten Vegetationsperiode unter den Plastikhütchen weniger Keimlinge vorhanden. An den übrigen Standorten konnte kein Effekt der Aufwuchshilfen festgestellt werden. Auch bei dieser Art war die Biomasse in beiden Behandlungsvarianten während der gesamten Versuchsdauer ähnlich gross (ANOVA 2010: $F_{1,47} = 0,228$, $P > 0,5$; ANOVA 2012: $F_{1,82} = 0,656$, $P > 0,5$); Abb. 13b).

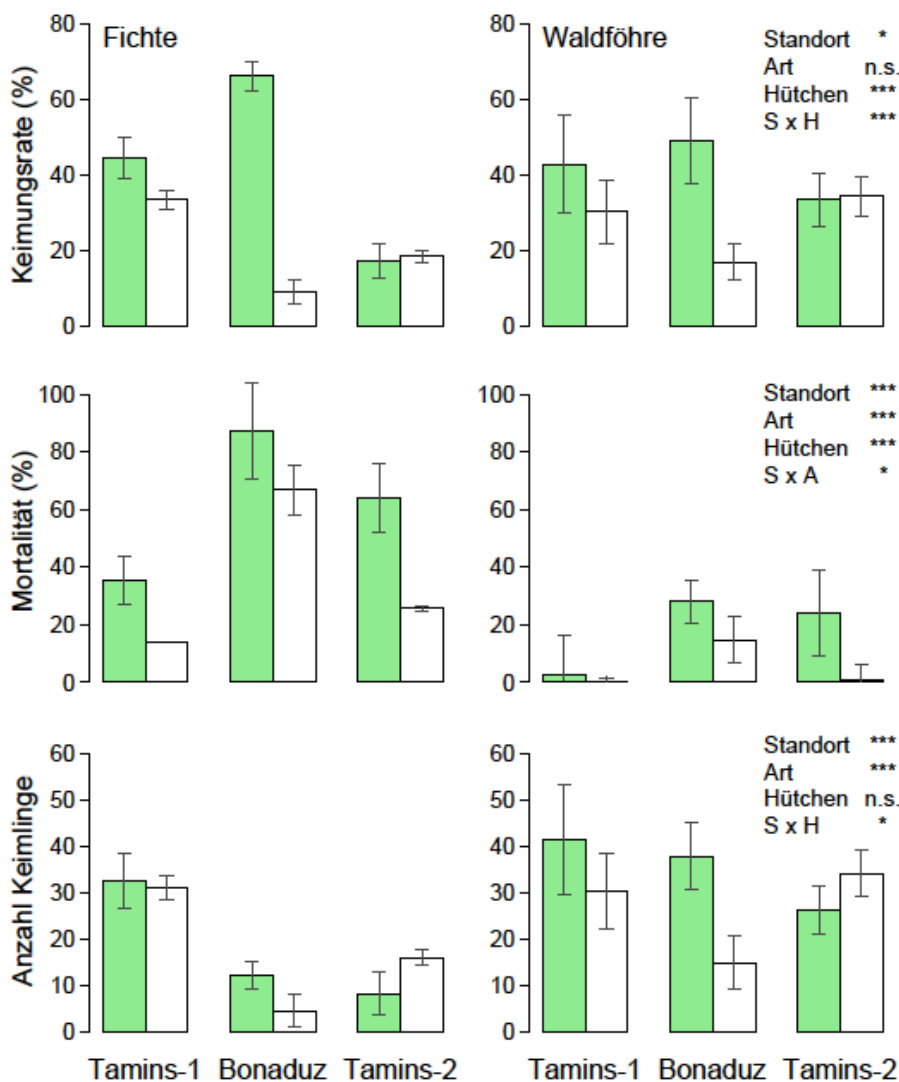


Abb. 12. Auswirkungen von Aufwuchshilfen in Form eines Plastikhütchens auf Keimung, Mortalität und Keimlingsdichte bei autochthonen Fichten und Waldföhren aus dem Rheintal während der ersten Vegetationsperiode nach Aussaat an den Standorten Bonaduz, Tamins-1 und Tamins-2. Grüne Balken: Kontrolle. Weisse Balken: Samen nach der Aussaat mit Plastikhütchen abgedeckt (Abb. 13a). Rechts: ANOVA-Resultate der Hauptfaktoren sowie signifikanter Interaktionen (* $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$, n.s. nicht signifikant). Mittlerer Bodenwassergehalt April–September 2011: Tamins-1 32%, Bonaduz 22%, Tamins-2 10%.

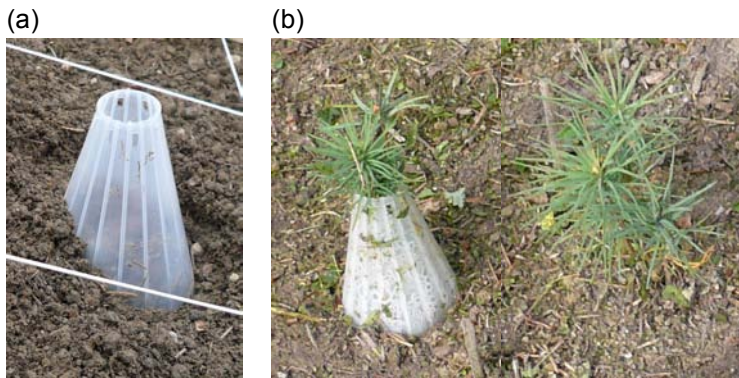


Abb. 13. Plastikhütchen als Aufwuchsschutz für Fichten- und Waldföhrenkeimlinge. (a) Die Plastikhütchen wurden nach der Saat über die Samen gestülpt und leicht in den Boden gedrückt. (b) Waldföhrenkeimlinge mit und ohne Aufwuchsschutz am Ende der ersten Vegetationsperiode im Herbst 2010. Bilder B. Moser.

5 Diskussion

Die Experimente im Churer Rheintal waren geprägt von den saisonalen Witterungsverhältnissen. Starke Niederschläge im Sommer 2010 beeinträchtigten die Wirkung der Regendächer, womit diese im ersten Jahr nicht die gewünschten Feuchtigkeitsunterschiede im Boden erzeugen konnten. Auf der anderen Seite beeinträchtigte die ausgeprägte Trockenheit im Frühling 2011 die Keimung der zweiten Aussaat so stark, dass bei der Fichte die Stichprobenzahlen pro Standort zu klein sind für statistisch gesicherte Aussagen. Die Untersuchungen lieferten spannende Resultate in Bezug auf die räumliche Variabilität der Bodenfeuchtigkeit innerhalb und zwischen Waldbeständen, und zeigten deutlich den Einfluss von interannueller Niederschlagsvariabilität auf Keimung und Aufwuchs von Waldföhre und Fichte.

5.1 Räumliche und zeitliche Variabilität

Bei der Bodenfeuchtigkeit haben wir kleinstandörtlich eine grosse Variabilität festgestellt, wobei der Bodenwassergehalt viel stärker zwischen den Standorten variierte als innerhalb (Abb. 3). Am feuchtesten Standort Tamins-1 fiel der Bodenwassergehalt selbst während längeren Trockenperioden im Sommer nie unter 15%, während am trockensten Standort Tamins-2 selbst im Winter im Stundenmittel maximal 13% Wassergehalt erreicht wurde. Diese Unterschiede zwischen den Standorten haben sich sowohl auf die Keimung und das Überleben als auch auf die spätere Wachstumsleistung der Waldföhren- und Fichtensämlinge ausgewirkt. Aufgrund unserer Resultate stellen wir fest, dass die Fichte nur auf Böden mit einer hohen Wasserspeicherkapazität eine gute Aufkommenswahrscheinlichkeit hat, während ihr Verjüngungspotential an trockeneren Standorten wie Bonaduz oder Tamins-2 selbst in feuchteren Jahren limitiert ist (Abb. 6). Im Gegensatz dazu kann die Waldföhre in feuchten Jahren auch an Standorten mit geringer Wasserspeicherkapazität des Bodens in grosser Zahl aufkommen, das Wachstum bleibt hier aber auch in feuchten Jahren relativ gering (Abb. 8). Der trockene Frühling 2011 wirkte sich nicht nur negativ auf Keimung und Überleben im selben Jahre aus, die gekeimten Waldföhren- und Fichtensämlinge zeigten auch im folgenden Jahr eine geringe Wachstumsleistung (Abb. 10). Diese Wachstumsreduktion als Folge von ungünstigen Witterungsbedingungen während der frühen Anwuchsphase war unabhängig von den edaphischen Eigenschaften und wurde bei beiden Arten festgestellt. Obwohl die Wachstumsleistung der Waldföhre

unter guten Witterungsbedingungen am mittleren Standort gleich tief war wie am trockensten Standort, haben Messungen der nichtstrukturierten Kohlenhydrate (NSC) gezeigt, dass die Sämlinge am mittelfeuchten Standort in Bonaduz über grössere Kohlenstoffreserven verfügen als diejenigen am trockensten Standort in Tamins-2. Dies bedeutet, dass Sämlinge in Bonaduz in den nächsten 1–2 Jahren besser gegen allfällige Trockenperioden gewappnet sind, was sich längerfristig als Vorteil erweisen könnte.

Auf den ersten Blick mögen diese Resultate banal erscheinen, denn sie widerspiegeln zum einen das Fehlen der Fichte in trockenen Gebieten oder an tief gelegenen, zur Austrocknung neigenden Südhängen (z.B. Wallis, Jurasüdkette), zum anderen die Persistenz der Waldföhre in den trockensten Gebieten der Schweiz. Darüber hinaus zeigt unser Experiment aber deutlich die Bedeutung von Standort, Klimavariation und Baumart. Die Keimungs- und Wachstumsbedingungen sind bereits unter den heute herrschenden Klimabedingungen sowohl räumlich als auch zeitlich sehr verschieden. Der Anwuchserfolg hängt in hohem Masse davon ab, ob einem Mastjahr gute Witterungsbedingungen im folgenden Frühjahr und Sommer folgen oder nicht, und auf welchen Untergrund die Samen fallen. Dies gilt umso mehr nach einem Störungsereignis (Holzschlag, Windwurf, Waldbrand), da dort in den ersten Jahren eine dichte Krautschicht heranwächst, die die Ansamlung zusehends verhindern kann (Wohlgemuth et al. 2002, Moser et al. 2010). So stellt sich die Frage, in welcher Weise der Klimawandel an trockenen Standorten einen Engpass bei der Waldverjüngung bewirken könnte. Gemäss Prognosen steigen nicht nur die Temperaturen, es ist auch mit einer markanten saisonalen Verschiebung der Niederschläge zu rechnen, d.h. generell weniger Sommerniederschlag und mehr Regen/Schnee im Winter (CH2011 2011). Damit wird die Evapotranspiration in den Sommermonaten im Vergleich zu heute ansteigen, was bedeutet, dass das Zusammentreffen einer Samenmast mit günstigen Witterungsbedingungen während der nächsten Vegetationszeit seltener wird. Bei der Fichte dürfte eine erfolgreiche Verjüngung an bereits heute trockenen Standorten wie Bonaduz oder Tamins-2 nur noch selten stattfinden, während eine pulsartige Verjüngung an feuchteren Standorten weiterhin wahrscheinlich bleibt. Dagegen wird die Waldföhre in Tieflagen des Churer Rheintals auch in Zukunft sowohl zeitlich wie räumlich ein grösseres Anwuchspotential haben als die Fichte. Der wesentlich trockentoleranteren Waldföhre reichen auch potenziell seltener werdende Verjüngungspulse, also das episodische Zusammentreffen von Samenmast und feuchten Frühjahrs- und Sommerbedingungen, um als Baumart in den Tieflagen des Churer Rheintal längerfristig zu überdauern. Im Wallis, wo die Jahresniederschläge rund 200 bis 300 mm niedriger sind, trotzen die Waldföhren seit langem einem wesentlich trockeneren Klima und werden hauptsächlich durch Beschattung infolge von Konkurrenz limitiert (Gimmi et al. 2010). So ist im Churer Rheintal auch nach vorübergehend starken oder wiederholten Trockenheiten nicht mit einem Verschwinden der Waldföhre zu rechnen.

5.2 Nicht heimische Provenienzen

Die im Experiment getesteten Provenienzen waren an die herrschenden Bedingungen ähnlich gut angepasst. Ein Grund für die überraschende Indifferenz könnte die Ähnlichkeit der Lokalklimata der Provenienzen sein. Im Gegensatz zu den grossen Unterschieden, die im Regendachexperiment in Leuk zwischen spanischen und autochthonen Walliser Provenienzen gefunden wurden (Richter et

al. 2012) und auf die verschiedenen Klimacharaktere von submediterrane und inneralpinem Trockenklima zurückgeführt werden können, sind die Klimata von Rheintal, Rhonetal, Tirol, Transsylvanien und der Ukraine in Bezug auf die durchschnittliche Niederschlagsverteilung relativ ähnlich (Tabelle 2). Die grössten Unterschiede im Klima der Herkunftsorte beziehen sich auf das Wasserdefizit während den Sommermonaten: Im Tirol besteht eine negative Bilanz zwischen Niederschlag und Verdunstung nur im Mai; dagegen weisen das Rhonetal und die Tieflagen der Karpaten von April bis September ein ausgeprägtes Wasserdefizit auf. Trotzdem konnten wir keine erhöhte Anpassung dieser Waldföhrenherkünfte an Sommertrockenheit feststellen. Da sich die Grundcharakteristika des lokalen Klimas wie saisonale Verteilung und interannuelle Variabilität der Niederschläge auch bei steigenden Temperaturen nicht grundsätzlich verändern werden (CH2011 2011), dürften die heute autochthonen Herkünfte auch in Zukunft am besten an das lokale Klima angepasst sein.

Literatur

- Bigler C, Bräker O U, Bugmann H, Dobbertin M, Rigling A (2006) Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9: 330-343
- CH2011 (2011) Swiss climate change scenarios CH2011. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zürich
- Chapin F S, Bloom A J, Field C B (1987) Plant responses to multiple environmental factors. *Bioscience* 37: 49-57
- Gimmi U, Wohlgemuth T, Rigling A, Hoffmann C W, Bürgi M (2010) Land-use and climate change effects in forest compositional trajectories in a dry Central-Alpine valley. *Annals of Forest Science* 67: 701
- Heide O M (1974) Growth and dormancy in Norway spruce ecotypes (*Picea abies*): 1. Interaction of photoperiod and temperature. *Physiologia Plantarum* 30: 1-12
- Hickling R, Roy D B, Hill J K, Fox R, Thomas C D (2006) The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology* 12: 450-455
- Hoch G, Popp M, Körner C (2002) Altitudinal increase of mobile carbon pools in *Pinus cembra* suggests sink limitation of growth at the Swiss treeline. *Oikos* 98: 361-374
- Holdridge L R (1947) Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science* 105: 367-368
- IPCC (2007) Climate change 2007: the physical science basis. WMO, Geneva
- Lenoir J, Gégout J C, Pierrat J C, Bontemps J D, Dhôte J F (2009) Differences between tree species seedling and adult altitudinal distribution in mountain forests during the recent warm period (1986-2006). *Ecography* 32: 765-777
- Leuzinger S, Körner C (2007) Water savings in mature deciduous forest trees under elevated CO₂. *Global Change Biology* 13: 2498-2508
- Leuzinger S, Luo Y Q, Beier C, Dieleman W, Vicca S, Körner C (2011) Do global change experiments overestimate impacts on terrestrial ecosystems? *Trends in Ecology & Evolution* 26: 236-241
- Maracchi G, Sirotenko O, Bindi M (2005) Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe. *Climatic Change* 70: 117-135
- Moser B, Temperli C, Schneiter G, Wohlgemuth T (2010) Potential shift in tree species composition after interaction of fire and drought in the Central Alps. *European Journal of Forest Research* 129: 625-633
- Partanen J (2004) Dependence of photoperiodic response of growth cessation on the stage of development in *Picea abies* and *Betula pendula* seedlings. *Forest Ecology and Management* 188: 137-148
- Partanen J, Beuker E (1999) Effects of photoperiod and thermal time on the growth rhythm of *Pinus sylvestris* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14: 487-497
- Peñuelas J, Ogaya R, Boada M, Jump A S (2007) Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography* 30: 829-837
- Rennenberg H, Loreto F, Polle A, Brilli F, Fares S, Beniwal R S, et al. (2006) Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant Biology* 8: 556-571
- Richter S, Kipfer T, Wohlgemuth T, Guerrero C, Ghazoul J, Moser B (2012) Phenotypic plasticity facilitates resistance to climate change in a highly variable environment. *Oecologia* 169: 269-279
- Rigling A, Elkin C, Dobbertin M, Eilmann B, Giuggiola A, Wohlgemuth T, et al. (2012) Wald und Klimawandel in der inneralpinen Trockenregion Visp. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 163: 481-492

- Schär C, Vidale P L, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger M A, et al. (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332-336
- Smitspinks B, Swanson B T, Markhart A H (1985) The effect of photoperiod and thermoperiod on cold-acclimation and growth of *Pinus sylvestris*. *Canadian Journal of Forest Research- Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 15: 453-460
- Usbeck T, Wohlgemuth T, Pfister C, Volz R, Beniston M, Dobbertin M (2010) Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. *International Journal of Climatology* 30: 347-358
- Walther G R, Beissner S, Burga C A (2005) Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science* 16: 541-548
- Wohlgemuth T, Conedera M, Kupferschmid Albisetti A, D., Moser B, Usbeck T, Brang P, et al. (2008) Effects of climate change on windthrow, forest fire and forest dynamics in Swiss forests. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 159: 336-343
- Wohlgemuth T, Kull P, Wütrich H (2002) Disturbance of microsites and early tree regeneration after windthrow in Swiss mountain forests due to the winter storm Vivian 1990. *Forest Snow and Landscape Research* 77: 17-47
- Xu C G, Gertner G Z, Scheller R M (2007) Potential effects of interaction between CO₂ and temperature on forest landscape response to global warming. *Global Change Biology* 13: 1469-1483
- Zimmermann N E, Bolliger J, Gehrig-Fasel J, Guisan A, Kienast F, Lischke H, et al. (2006) Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren? *Forum für Wissen* 2006: 63-71