



Report

TroLiFa-Plus: Trockenheit als limitierender Faktor für Keimung, Etablierung und Wachstum von 0 bis 2-jährigen Waldföhren und Fichten. Schlussbericht im Forschungsprogramm "Wald und Klimawandel" des Bundesamtes für Umwelt und der Eidg. Forschungsanstalt WSL

Author(s):

Moser, Barbara; Wohlgemuth, Thomas

Publication Date:

2017

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000229126> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Schlussbericht des Projekts

TroLiFa-Plus: Trockenheit als limitierender Faktor für Keimung, Etablierung und Wachstum von 0 bis 2-jährigen Waldföhren und Fichten¹

im Forschungsprogramm Wald und Klimawandel

Barbara Moser, Thomas Wohlgemuth

¹ Originaltitel: Trockenheit als limitierender Faktor für den An- und Aufwuchs von Hauptbaumarten

Revidierte Fassung vom 17. Juli 2017



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

Autoren

Babara Moser¹, Thomas Wohlgemuth¹

¹Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf

Ein Projekt-Schlussbericht aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL

(www.wsl.ch/wald_klima)

Projektlaufzeit: 01.08.2012–31.03.2015.

Zitierung

Moser, B.; Wohlgemuth, T. 2017. TroLiFa-Plus: Trockenheit als limitierender Faktor für den An- und Aufwuchs von Hauptbaumarten. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 19 S.

Im pdf-Format zu beziehen über www.wsl.ch/wald_klima

Dank

Ein grosser Dank geht an Evelyne Schnider und Annina Walter, die massgeblich am Aufbau des Experiments beteiligt waren. Für unermüdliches Arbeiten in Feld und Labor danken wir C. Bachofen, H. Bachofen, C. Baumann, H. Ding, R. Köchli, A. Käser, K. Kramer, S. Kreuzer, Z. Michalova, J. Müller, T. Reich, S. Steinböck, D. Trummer und E. Wilson. Die Samenernte wurde ermöglicht durch S. Berdos, C. Calderón Guerrero, G. Goesch, B. Kinigadner, I. Latchev, A. Tashev und N. Tashev. Unser Dank geht auch an die Forstreviere Tamins und Bonaduz, die die Kahlschläge ermöglichten und die Versuchsstandorte zur Verfügung stellten.

Inhalt

Zusammenfassung	4
Summary	5
1 Einleitung	6
2 Material und Methoden	8
3 Ergebnisse	11
4 Diskussion	12
5 Literatur	16
6 Anhang	19

Zusammenfassung

TroLiFa-Plus ist die Weiterführung des Projektes TroLiFa (2009–2011), welches das Verjüngungspotenzial von Waldföhre (*Pinus sylvestris*) und Fichte (*Picea abies*) in Tieflagen des inneralpinen Trockentals des Rheins (Region Bonaduz/Tamins) unter zukünftigen Klimabedingungen untersucht hat. Dazu wurden in drei südexponierten Bestandeslücken mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften Samen von heimischen und nicht-heimischen Waldföhren- und Fichtenherkünften ausgesät und deren Keimung und Anwuchs während zwei Jahren verfolgt. Im Rahmen von TroLiFa (2009–2011) und TroLiFa-Plus wurden insgesamt drei Saaten durchgeführt. Um eine Abnahme der Niederschläge während der Vegetationszeit zu simulieren, wurde die Bodenfeuchtigkeit innerhalb der Standorte auf 10 Flächen (1,5 m x 1,5 m) mittels Regenreduktionsdächern manipuliert.

Die klimatische Wasserbilanz im Frühjahr des Keimungsjahres hat den Verjüngungserfolg von Waldföhre und Fichte mehr beeinflusst als alle anderen Faktoren: Sämlinge beider Arten, die im feuchten Frühjahr 2013 keimten, überlebten nicht nur häufiger, sie hatten nach zwei Jahren auch bis zu fünfmal mehr Biomasse als gleichaltrige Sämlinge aus dem trockenen Frühjahr 2011. Die Waldföhre konnte sich in Jahren mit mittlerer bis guter klimatischer Wasserbilanz an allen Standorten etablieren, während von der Fichte nur am feuchtesten Standort mehr als 10% der Saat aufkamen. Bei positiver klimatischer Wasserbilanz im Frühjahr schnitten die meisten mediterranen und osteuropäischen Herkünfte schlechter ab als diejenigen aus dem Rhein- und dem Rhonetal, während die Keimlingszahlen im niederschlagsarmen Frühjahr 2011 so klein waren, dass keine Unterschiede festgestellt werden konnten.

Aufgrund der Tatsachen, dass (i) die Frühlingsniederschläge in den inneralpinen Trockentälern wichtiger sind für den erfolgreichen Anwuchs von Waldföhre und Fichte als die Sommerniederschläge, und sich die Frühlingsniederschläge in Zukunft nur wenig ändern werden, (ii) die Niederschläge in diesen Gebieten generell eine hohe Jahr-zu-Jahr-Variabilität aufweisen, und (iii) Verjüngung bereits heute nicht jedes Jahr sondern in Pulsen stattfindet, betrachten wir es als wahrscheinlich, dass sich die Waldföhre im Churer Rheintal auch in Zukunft regelmässig verjüngen wird, während das Aufkommen der Fichte in Bestandeslücken an trockenen, südexponierten Standorten auch in Zukunft eine Ausnahme bleiben dürfte. Dies umso mehr andere alpine Trockentälern wie das Aostatal, das Rhonetal und das Vinschgau, wo die Waldföhre bestandesbildend ist, bereits heute ein trockeneres Klima aufweisen als das Rheintal.

Summary

TroLiFa-Plus is the follow-up project of TroLiFa (2009–2011), which aimed at evaluating the regeneration potential of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Norway spruce (*Picea abies*) under future climatic conditions at low elevation in the dry inneralpine valley of the Rhine near Bonaduz/Tamins. Seeds of Scots pine and Norway spruce, of native and non-native origin, were sown repeatedly in forest clearings at three south-exposed sites with differing soil characteristics and in three years with different weather conditions. To simulate decreasing precipitation, soil moisture was manipulated on 10 plots (1.5 m x 1.5 m) per site with throughfall reduction roofs. Seedling performance was monitored for two years after emergence.

In both species, regeneration success was primarily driven by the climatic water deficit during the three months following seed sowing: the seedlings having emerged in the rainy spring of 2013 had a higher survival rate and accumulated up to five times more aboveground biomass than the seedlings emerging in the dry spring of 2011. In years with an average or even positive water balance, Scots pine seedlings were able to establish at all sites. In Norway spruce, by contrast, establishment rate exceeded 10% of viable seeds only at the site with the highest water retention capacity. In years with a positive water balance during spring, the seedlings from the Rhine and Rhone valleys outperformed those from most Mediterranean and Eastern European provenances, while seedling numbers were too low to detect any differences in the dry spring of 2011.

Based on the facts that (i) successful regeneration of Scots pine and Norway spruce in dry inneralpine valleys depends on spring rather than summer precipitation, and spring precipitation is projected to remain constant in the future, (ii) precipitation in these regions is subject to high inter-annual variation, and (iii) forest regeneration is a discrete process that occurs in pulses, we suggest that periodical regeneration of Scots pine will be likely in the Rhine valley even under future climatic conditions, whereas the establishment of Norway spruce may remain an exceptional event in dry, south-exposed clearings. This is corroborated by the fact that other dry inneralpine regions such as the valleys of Aosta, Rhone and Vinschgau, where Scots pine is a predominant tree at lower elevations, already today have a drier climate than the Rhine valley.

1 Einleitung

Der Steuerungsausschuss des Forschungsprogramms "Wald und Klimawandel" hat beschlossen, die Regenreduktions-Experimente im Churer Rheintal auch in der zweiten Programmphase zu unterstützen. Die Weiterführung der Verjüngungsexperimente mit verschiedenen schweizerischen und europäischen Waldföhren- und Fichtenprovenienzen sollte robustere Resultate liefern bezüglich Überlebensrate und Wachstumsleistung von Keimlingen und Sämlingen in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften und Witterung.

1.1 TroLiFa (2009–2011)

Das Projekt TroLiFa untersuchte die Plastizität verschiedener europäischer Waldföhren- und Fichtenprovenienzen bezüglich Trockenheit in der Jugendphase und prüfte Strategien, die eine natürliche Verjüngung in den Tieflagen der inneralpinen Trockentäler auch unter einem sich ändernden Klima begünstigen. Die experimentell getesteten Strategien umfassten (i) passive Anpassung durch das Überleben resistenter Individuen sowie (ii) aktive Anpassung über das Einbringen resistenter Provenienzen von heute bestandesbildenden Baumarten. Die Plastizität verschiedener Provenienzen wurde mittels künstlich generierten Bodenfeuchtigkeitsgradienten (Regenreduktionsdächer aus Plexiglas) in Bestandeslücken an edaphisch unterschiedlichen Standorten im Churer Rheintal getestet (Details s. Moser & Wohlgemuth 2013). Nach zwei Vegetationsperioden konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- (1) Der Verjüngungserfolg in den Aussaatjahren 2010 und 2011 war hauptsächlich von der saisonalen Witterung geprägt, wobei ein trockener Frühling 2011 das Aufkommen der Fichten an allen Standorten und dasjenige der Waldföhre an den Standorten mit mittlerer bis geringer Wasserspeicherkapazität weitgehend verhinderte.
- (2) Nebst der saisonalen Witterung waren auch die edaphischen Gegebenheiten an den drei Versuchsstandorten mitverantwortlich für den Anwuchserfolg bzw. -misserfolg.
- (3) Die Keimlinge/Sämlinge der verschiedenen Samenherkünfte unterschieden sich nicht bezüglich Überlebensrate und Wachstumsleistung. Es gab jedoch geringfügige Unterschiede in der Plastizität der oberirdischen Biomasse, was auf unterschiedliche Trockenresistenz der Herkünfte hinweisen könnte (Richter et al. 2012).
- (4) Begleitende Massnahmen in Form eines Aufwuchsschutzes reduzierte zwar die durch Mäuse verursachte Keimlingsmortalität, jedoch nicht den durch Trockenheit bedingten Ausfall.

1.2 TroLiFa-Plus

Im Folgeprojekt TroLiFa-Plus sollten die Interaktion von saisonaler Witterung und Standort vertieft untersucht werden und die Konsequenzen für räumliche Unterschiede des Verjüngungspotenzials abgeschätzt werden. Gemäss Beier et al. (2012) fehlen weltweit nach wie vor Regenmanipulationsexperimente in Trockengebieten oder an lokal trockenen Standorten. Weiter wurden bei der Modellierung von zukünftigen Baumartenverbreitungen die Effekte von Trockenheit auf die räumliche Variabilität der Bodenfeuchtigkeit kaum berücksichtigt (Zimmermann & Bugmann 2008). Deshalb wurde das Ansaatexperiment TroLiFa (2009-2011) mit Fichte und Waldföhre wiederholt, wobei

bei der Föhre die gleichen Provenienzen verwendet wurden wie im Regendachexperiment in Leuk (2012–2015; SNFProjekt 31003A-140966). Die Bodenfeuchtmessungen an den TroLiFa-Standorten wurden weitergeführt.

Ziele:

- (1) Nach den extremen Witterungsbedingungen im Frühjahr 2010 (sehr feucht) bzw. 2011 (sehr trocken in der ersten Jahreshälfte) sollte der Anwuchserfolg von Fichte und Waldföhre nochmals unter anderen saisonalen Witterungsbedingungen verfolgt werden.
- (2) Mit dem Vergleich von Wachstum und Photosyntheseleistung verschiedener Föhrenprovenienzen unter standardisierten (Leuk) und natürlichen (Chur) Bedingungen sollte abgeschätzt werden, inwiefern die Ergebnisse der Regendachexperimente (Richter et al. 2012, Bachofen 2016, Bachofen et al. 2016), die auch Faktoren wie erhöhte CO₂-Konzentration, extreme Trockenereignisse (4-monatige Dürre) und Frost einschliessen, auf das Churer Rheintal übertragbar sind.
- (3) Die aufgrund der Messungen 2011 formulierte Hypothese, dass die Wasserkapazität von Böden entlang eines Feuchtegradienten verschieden auf anhaltende Trockenheit reagiert, sollte mit weiteren Messreihen 2012-2014 getestet werden.

2 Material und Methoden

Die Trockenresistenz von Waldföhren und Fichten während der Verjüngungsphase (Ansamung und Anwuchs) wurde an drei südexponierten, edaphisch unterschiedlichen Waldstandorten unterhalb von 1'000 m ü. M. im Churer Rheintal getestet. Lokale Waldföhren- und Fichtenherkünfte aus dem Rheintal wurden mit Herkünften aus bereits heute trockeneren Gegenden wie den Tieflagen des Rheintals, des Inntals (Tirol), des Wienerbeckens, Transsylvaniens (West-Ost-Gradient) sowie aus Gebieten des Mittelmeers in Spanien, Bulgarien und Griechenland (Nord-Süd-Gradient) verglichen (Tabelle 1). Die Samen stammen nicht von anerkannten Samenerntebeständen, die meist gutwüchsige Standorte repräsentieren, sondern von autochthonen Beständen an möglichst trockenen und tief gelegenen Standorten. Dies ist insbesondere bei den Herkünften aus dem Mittelmeergebiet entscheidend, da die Waldföhre dort ausschliesslich in höheren Lagen vorkommt, wo oft mehr Regen fällt als in den Tieflagen Zentraleuropas.

Versuchsaufbau, Datenerhebung und -analyse sind im Detail in Moser et al. (2015; deutsch, Anhang 3) und Moser et al. (2017; englisch, Anhang 4) beschrieben.

Tabelle 1. Samenherkünfte, die im Projekt TroLiFa-Plus im Frühling 2013 ausgesät wurden, sowie klimatische Bedingungen am Herkunftsort. T_{Jan} : mittlere Januar-temperatur; T_{Jul} : mittlere Julitemperatur; N: mittlerer Jahresniederschlag; WB_{AMJ} : klimatische Wasserbilanz Apr–Jun; WB_{JAS} : klimatische Wasserbilanz Jul–Sep (Angaben beziehen sich auf die Periode 1950–2000 und stammen von MeteoSchweiz für das Rhein- und Rhonetal sowie von www.worldclim.org für alle übrigen Herkünfte).

Herkunft, Land	Höhe (m ü. M.)	T_{Jan} (°C)	T_{Jul} (°C)	N (mm)	WB_{AMJ} (mm)	WB_{JAS} (mm)
Waldföhre (<i>Pinus sylvestris</i>)						
Rheintal, CH	570	0.0	17.9	810	-24	-8
Rhonetal, CH	560	-0.7	19.2	603	-116	-148
Inntal (Tirol), AT	710	-1.7	17.2	917	41	20
Transsylvanien, RO	120	-2.0	20.7	609	-59	-167
Peñayagolosa, ES	1'200	1.2	17.8	687	30	-147
Rhodopen, BG	1'400	-3.8	15.1	664	25	-131
Chalkidiki, GR	1'360	-1.8	17.4	613	-27	-183
Fichte (<i>Picea abies</i>)						
Rheintal, CH	670	0.0	17.9	810	-24	-8
Rhonetal, CH	620	-0.7	19.2	603	-116	-148
Wienerbecken, AT	800	-3.7	16.3	835	35	-8
Transsylvanien, RO	600	-4.0	18.5	669	0	-91

2.1 Projektablauf

Das Projekt TroLiFa-Plus startete im Sommer 2012 mit der Weiterführung des Experiments TroLiFa (2009–2011). Im Herbst 2012 wurden die damals 3-jährigen Sämlinge geerntet und die oberirdische Biomasse bestimmt. Die Auswertungen und Resultate

wurden im Rahmen des Schlussberichts TroLiFa (2009–2011) beschrieben und von der Programmleitung begutachtet und gutgeheissen (Moser & Wohlgemuth 2013).

Im Frühling 2013 wurden plangemäss erneut Waldföhren- und Fichtensamen ausgesät. Da sich bei TroLiFa (2009–2011) gezeigt hatte, dass die Regendächer nur einen geringen Effekt auf Bodenfeuchtigkeit und Anwuchserfolg haben (Moser & Wohlgemuth 2013), wurden bei TroLiFa-Plus nur noch die Regendächer mit 100% bzw. 33% Durchlass beibehalten (Abb. 1), was pro Standort 10 und bzw. total 30 Regendächer über entsprechend vielen Saatflächen ergab. Der Keimungserfolg wurde bis Ende Juni alle 2–3 Wochen protokolliert, danach nochmals Ende September 2013. Die Bodenfeuchtmessungen von TroLiFa (2009–2011) wurden weitergeführt. Mitte August wurden Wärmebilder von allen Keimlingen gemacht. Ende August fand eine bodenkundliche Beurteilung der drei Untersuchungsflächen durch Lorenz Walthert, WSL, statt. Mitte Oktober wurden pro Saatquadrat 1–2 Keimlinge geerntet, getrocknet und die oberirdische Biomasse bestimmt.

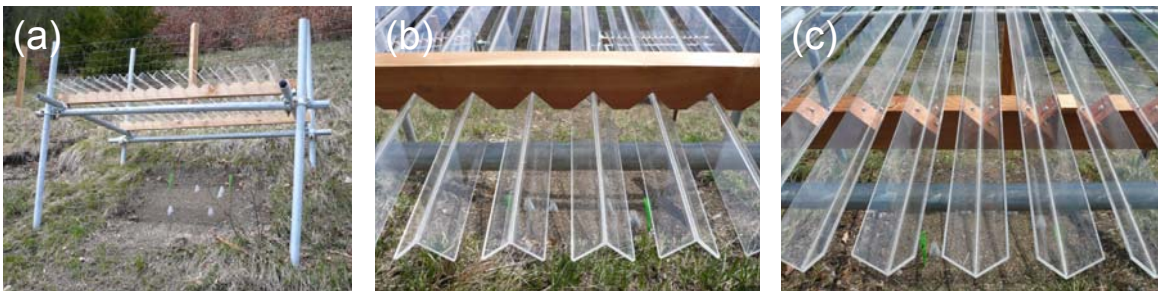


Abbildung 1. Regendach mit zugehöriger Saatfläche (a) sowie Dachkonstruktion mit theoretisch 100% (b) bzw. 33% (c) Regendurchlass. Detaillierte Angaben s. Moser & Wohlgemuth (2013) und Moser et al. (2015). Abbildung abgeändert aus Moser et al. (2015).

Im Frühling 2014 wurde das Bodenfeuchtmessnetz erweitert, so dass während der Vegetationszeit insgesamt 30 Sensoren (MPS-1) in 15 cm Bodentiefe und 12 Sensoren in 5 cm Bodentiefe installiert waren. Die Nährstoffverfügbarkeit in den einzelnen Saatflächen wurde mittels Harzsäcken gemessen (Schleppi et al. 2012). Zwei Datalogger wurden über Winter beschädigt und mussten ersetzt werden. Ende Juni 2014 wurden auf allen Versuchsflächen während einem ganzen Tag (Sonnenauf- bis Sonnenuntergang) Porometermessungen an ausgewählten Versuchspflanzen durchgeführt. Diese Messungen wurden im August durch Wärmebilder aller Versuchspflanzen ergänzt. Mitte November 2014 fand die Schlussernte (oberirdische Biomasse aller noch lebender Individuen) und anschliessend die Datenerhebung im Labor (Biomassmessungen, Analyse der Wärmebilder) statt. Auf die Analyse nichtstrukturierter Kohlenstoffe (NSC) wurde verzichtet, weil die Regendachexperimente von Leuk dazu sehr ausführliche Resultate liefern. Wir sind der Meinung, dass der Erkenntnisgewinn solcher Messungen im Rahmen von TroLiFa-Plus zu klein ist, um den Zeit- und Kostenaufwand zu rechtfertigen (2 Personenmonate für Mahlen und Einwiegen der Proben; >Fr. 5'000 für die Laboranalysen; im Projektbudget nicht enthalten). Bei der Fichte sind NSC-Messungen wegen zu kleinen Biomassmengen nicht möglich.

Die bisher erschienenen Publikationen sind im Anhang beigelegt. Eine weitere Publikation, die die Resultate der Churer und Leuker Experimente verknüpft, ist in Vorbereitung.

3 Ergebnisse

Die wichtigsten Resultate von TroLiFa (2009–2011) und TroLiFa-Plus wurden zusammengetragen und in deutscher Sprache publiziert (Moser et al. 2015; Anhang 3). Eine zweite Publikation mit sämtlichen bisher unveröffentlichten Resultaten wurde in der internationalen ISI-Zeitschrift *Oecologia* veröffentlicht (Moser et al. 2017; Anhang 4).

4 Diskussion

Die Resultate von TroLiFa-Plus wurden sowohl in der SZF-Schwerpunktnummer über das Forschungsprogramm "Wald und Klimawandel" (Moser et al. 2015; Anhang 3) als auch im Kapitel 3.2 der Programm-Synthese ("Genetische Variation und lokale Anpassung bei Waldbaumarten im Zeichen des Klimawandels") diskutiert. Beide Beiträge wurden von der Programmleitung und dem Steuerungsausschuss des Forschungsprogramms "Wald und Klimawandel" begutachtet und gutgeheissen. Am Rande fliessen Teile der Resultate auch in das Kapitel 3.3 der Programm-Synthese ein ("Verjüngung von Baumarten im Klimawandel"). Eine ausgedehnte Diskussion findet sich auch in der englischen Publikation Moser et al. (2017). Die entsprechenden Diskussionen sollen hier nicht wiederholt werden. Stattdessen legen wir den Fokus auf die Verknüpfung der Resultate mit denjenigen der Leuker Regendachexperimente sowie die Betrachtung der Ergebnisse in Bezug auf die Klimaszenarien A1B und A2 (CH2011 2011).

Ex situ-Experimente Leuk

Feldstudien ("in situ") widerspiegeln zwar natürliche Verhältnisse, doch sind Aussagen über Ursache und Wirkung von gemessenen Grössen oft schwierig weil in der Natur viele abiotische Faktoren miteinander korreliert sind (z. Bsp. Höhe, Temperatur und Niederschlag). Dies bedeutet, dass der Effekt eines Faktors nicht unabhängig von anderen beurteilt werden kann. Experimente in Gewächshäusern oder Pflanzgärten ("ex situ") hingegen werden oft verwendet, um Faktoren wie Lichtverhältnisse oder Bodeneigenschaften konstant zu halten, wenn sie nicht Ziel der Untersuchung sind (sogenannte „confounding factors“). So wurden auch die Auswirkungen von steigenden Temperaturen und zunehmender Trockenheit auf die Vegetation in unzähligen ex situ Experimenten untersucht (Beier et al. 2012). Die Regendachexperimente in Leuk zeigen, dass eine Sommertrockenheit, wie sie gegen Ende dieses Jahrhunderts in weiten Teilen der Schweiz die Regel sein könnte (-20% Niederschlag in den Sommermonaten; CH2011 2011), sowohl Keimung als auch Wachstum der Waldföhre während der Etablierungsphase erheblich einschränkt, und dass diese Einschränkung sowohl für einheimische als auch südlichere Herkünfte aus dem Mittelmeerraum zutrifft (Richter et al. 2012, Bachofen 2016). Südlichere Herkünfte sind insofern bevorteilt, als sie weniger Wasser zur Keimung benötigen und unabhängig von den Witterungsbedingungen ein erhöhtes Wurzel/Spross-Verhältnis aufweisen, womit die Pflanzen während trockenen Perioden ihren Spross effizienter und/oder länger mit Wasser versorgen können. Diese Vorteile hatten jedoch keinen Einfluss auf die Überlebensraten, die bei allen Herkünften ähnlich hoch waren. Gleichzeitig konnten wir nachweisen, dass die Nadeln der südlicheren Herkünfte während der gesamten Winterzeit gleich frostresistent sind wie die der einheimischen (Bachofen et al. 2016). Dies gilt auch für die Schwarzföhre (*Pinus nigra*) und in geringerem Mass für die Aleppoföhre (*Pinus halepensis*). Beobachtungen im Leuker Regendachexperiment lassen aber vermuten, dass die Aleppoföhre anfällig ist auf Frosttrocknis, also auf Trockenheit als Folge von gefrorenem Boden. Ob dies auch für die südlicheren Herkünfte der Wald- und der Schwarzföhre zutrifft, können wir nicht beurteilen.

In situ-Experimente Chur

Ex situ-Untersuchungen wie diejenigen von Leuk lassen keine Schlüsse über den räumlichen und standörtlichen Geltungsbereich der Ergebnisse zu, weil sie die räumliche Variabilität gezielt ausschliessen. Dies steht im Widerspruch zu einer wachsenden Zahl von Studien, die in der Vielfalt von Landschaft und Umweltbedingungen ein beträchtliches Pufferpotenzial bezüglich klimatischer Veränderungen orten (Leuzinger et al. 2011). Pufferpotenzial wurde u.a. in Bezug auf den Boden (Fridley et al. 2011, Fridley & Wright 2012, García-Palacios et al. 2012, Piper et al. 2013), die natürliche thermische Variabilität in flachem wie gebirgigem Terrain (Scherrer & Körner 2011, Lenoir et al. 2013, Slavich et al. 2014) als auch das ausgeglichene Binnenklima des Waldes (von Arx et al. 2013) aufgezeigt. Die vorliegenden Resultate von TroLiFa (2009–2011) und TroLiFa-Plus reihen sich hier ein und zeigen, dass die Häufigkeit von Jahren mit günstigen Verjüngungsbedingungen an Standorten mit hoher Wasserspeicherkapazität grösser ist als an Standorten mit durchlässigen Böden (s. dazu Diskussion in Moser et al. 2017). Nebst der räumlichen Heterogenität der Bodenverhältnisse darf auch die zeitliche Variabilität der Niederschläge bei der Beurteilung des Waldverjüngungspotenzials nicht vernachlässigt werden. Einerseits ist der Etablierungserfolg von Waldföhre und Fichte in hohem Masse von den Frühlingsniederschlägen abhängig, welche sich gemäss heutigen Klimaszenarien bis Ende des 21sten Jahrhunderts kaum verändern werden (CH2011 2011). Andererseits sind die Keimlinge nur in Jahren mit günstiger Witterung zahlreich und gross genug, um auf die Dauer konkurrenzfähig zu sein. Dank der beträchtlichen Jahr-zu-Jahr-Variabilität der Niederschläge wird es selbst bei steigenden Temperaturen und sinkenden Niederschlägen von Zeit zu Zeit günstige Bedingungen für eine pulsartige Waldverjüngung geben, wie sie schon immer stattgefunden hat (Grubb 1977; s. dazu Diskussion in Moser et al. 2015). Wird das Klima im Churer Rheintal mit jenem von anderen inneralpinen Trockentälern verglichen, zeigt sich, dass bei einem angenommenen Temperaturanstieg von 3 K während den Frühlingsmonaten immer noch feuchtere Bedingungen herrschen werden als heutzutage in Aostatal, Rhonetal und Vinschgau (Abb. 2). Gemäss Klimaszenarien A1B und A2 kann eine solche Temperaturerhöhung in den Tieflagen der Schweiz bis Ende dieses Jahrhunderts eintreten (CH2011 2011). Im Rhonetal sind nach dem extremen Trockenjahr 2003 zwar vermehrt adulte Waldföhren abgestorben (Bigler et al. 2006), doch gilt diese Baumart als resilient (Eilmann et al. 2010, Eilmann et al. 2013). Insbesondere kann ein vorzeitiges Absterben durch immer dichtere Bestockung infolge Überalterung (Giuggiola et al. 2013) oder Änderungen in der Landnutzung (Gimmi et al. 2010) nicht ausgeschlossen werden.

Folgerungen für die Praxis

Die Verjüngung von Waldföhren ist in den inneralpinen Trockentälern sowohl durch die grosse Niederschlagsvariation von Jahr zu Jahr als auch durch saisonal starke Schwankungen der Niederschläge beträchtlich gegen sich ändernde Klimabedingungen gepuffert. Die Autoren sind der Meinung, dass das Einbringen nicht-heimischer Herkünfte aus bereits heute trockeneren Gebieten als potenzielle waldbauliche Massnahme zu hinterfragen ist. Die Annahme, dass solche Herkünfte Trockenheit besser ertragen als die einheimischen, bezieht sich üblicherweise auf Altbäume. Doch die nachhaltige Erneuerung von Wäldern ist in hohem Masse von der Verjüngung abhängig. Unsere Studie zeigt einerseits, dass Föhrenverjüngung in den Zentralalpen nur in Jahren mit

günstiger Witterung stattfindet und daran sind die einheimischen Herkünfte sehr gut angepasst; andererseits sind junge Waldfähren und Fichten aus kontinentalen Gebieten Osteuropas oder dem Mittelmeerraum wenn überhaupt nur geringfügig besser an Trockenheit angepasst als die einheimischen, insbesondere jene aus dem Rhonetal. Zudem ist bis jetzt nicht geklärt, ob Anpassungen an trockene Standorte, wie sie in Provenienzversuchen oft gemessen wurden, genetisch fixiert und damit an die Nachkommen vererbbar sind; oder ob Anpassungen an Trockenheit lediglich epigenetischer Natur sind und somit wieder verschwinden, wenn ein Samenbaum unter feuchteren Bedingungen wächst (Skrøppa et al. 2010). Nicht im Fokus dieses Projekts aber doch relevant für Trockentäler ist die Feststellung, dass Eichen, welche natürlicherweise auf Waldfähren folgen (Burnand 1976) und in der Klimawandeldebatte als zukunftsfähig erachtet werden (Rigling et al. 2006), in ihrem Aufkommen durch Verbiss stark limitiert sind (Nussbaumer & Wohlgemuth 2016).

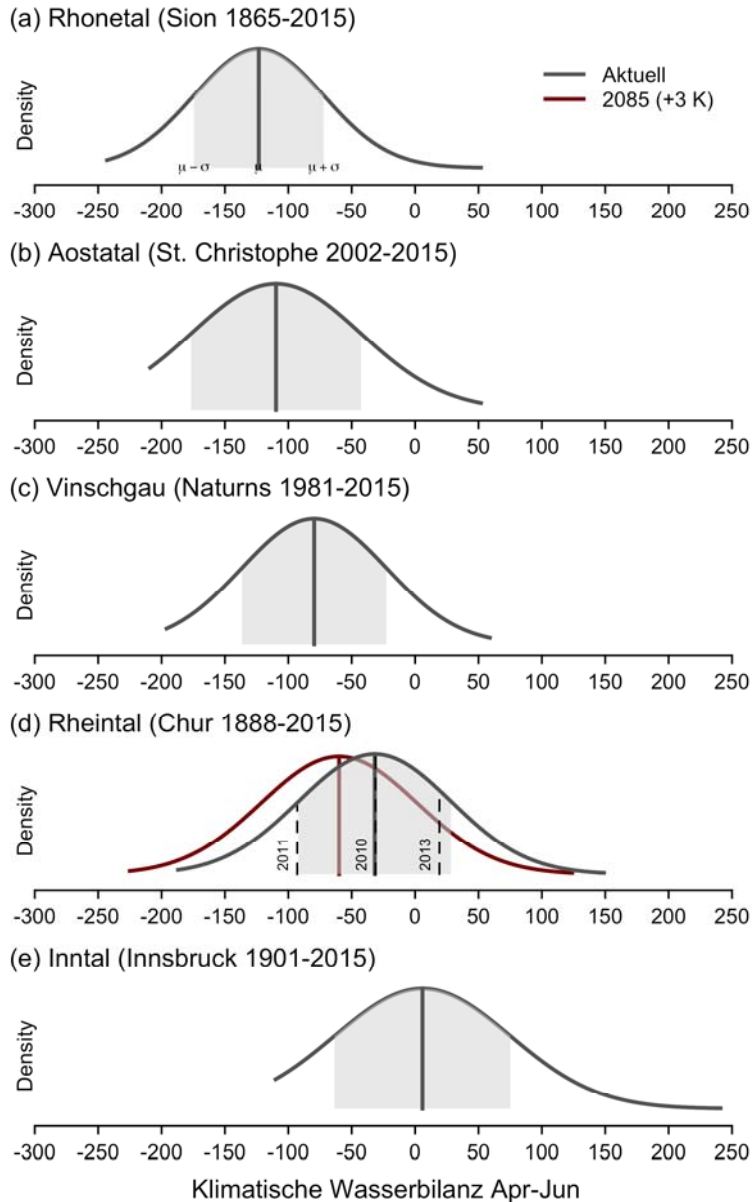


Abbildung 2. Variabilität der klimatischen Wasserbilanz von April–Juni in fünf Zentralalpentälern (a-e): Die grauen Kurven entsprechen einer an die jährliche Wasserbilanz angepassten Normalverteilung. Anfangs- und Endpunkt entsprechen dem tiefsten bzw. höchsten Messpunkt einer Station. Die langjährigen Mittelwerte der einzelnen Stationen sind als vertikale Linie dargestellt, und die hellgraue Fläche bezeichnet den Mittelwert ± 1 Standardabweichung. Rheintal: Die gestrichelten vertikalen Linien kennzeichnen die Aussaatjahre der TroLiFa und TroLiFa-Plus Experimente, während die roten Linie die Klimaszenarien A2 bzw. A1B bezeichnet, gemäss denen in den Tieflagen der Schweiz während der Frühlingszeit mit einem Temperaturanstieg von 3 K bis 2085 zu rechnen ist (CH2011 2011). Die Angaben beziehen sich auf die angegebenen Perioden und wurden von (a,d) MeteoSchweiz, (b) Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta, (c) Hydrografisches Amt der Autonomen Provinz Bozen und (e) European Climate Assessment & Dataset (<http://www.ecad.eu>; Klein Tank et al. 2002) zur Verfügung gestellt.

5 Literatur

Bachofen C (2016) Pine regeneration under future climate conditions: effects of local adaptation and acclimation. Dissertation No. 23605, ETH Zürich, Zürich

Bachofen C, Wohlgemuth T, Ghazoul J, Moser B (2016) Cold temperature extremes during spring do not limit the range shift of Mediterranean pines into regions with intermittent frost. *Funct Ecol* 30: 856-865

Beier C, Beierkuhnlein C, Wohlgemuth T, Peñuelas J, Emmett B, Körner C, et al. (2012) Precipitation manipulation experiments - challenges and recommendations for the future. *Ecol Lett* 15: 899-911

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

Burnand J (1976) *Quercus pubescens*-Wälder und ihre ökologischen Grenzen im Wallis (Zentralalpen). Veröff Geobot Inst ETH, Stiftung Rübel, Zürich 59: 1-139

CH2011 (2011) Swiss climate change scenarios CH2011. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zürich

Eilmann B, Buchmann N, Siegwolf R, Saurer M, Cherubini P, Rigling A (2010) Fast response of Scots pine to improved water availability reflected in tree-ring width and delta 13C. *Plant Cell Environ* 33: 1351-1360

Eilmann B, Dobbertin M, Rigling A (2013) Growth response of Scots pine with different crown transparency status to drought release. *Ann For Sci* 70: 685-693

Fridley J D, Grime J P, Askew A P, Moser B, Stevens C J (2011) Soil heterogeneity buffers community response to climate change in species-rich grassland. *Glob Change Biol* 17: 2001-2011

Fridley J D, Wright J P (2012) Drivers of secondary succession rates across temperate latitudes of the Eastern USA: climate, soils, and species pools. *Oecologia* 168: 1069-1077

García-Palacios P, Maestre F T, Bardgett R D, de Kroon H (2012) Plant responses to soil heterogeneity and global environmental change. *J Ecol* 100: 1303-1314

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. *Ann For Sci* 67: 701

Giuggiola A, Bugmann H, Zingg A, Dobbertin M, Rigling A (2013) Reduction of stand density increases drought resistance in xeric Scots pine forests. *Forest Ecol Manage* 310: 827-835

Grubb P J (1977) Maintenance of species-richness in plant communities - importance of regeneration niche. *Biol Rev Cambridge Philosophic Soc* 52: 107-145

Klein Tank A M G, Wijngaard J B, Konnen G P, Böhm R, Demaree G, Gocheva A, et al. (2002) Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int J Climatol* 22: 1441-1453

Lenoir J, Graae B J, Aarrestad P A, Alsos I G, Armbruster W S, Austrheim G, et al. (2013) Local temperatures inferred from plant communities suggest strong spatial buffering of climate warming across Northern Europe. *Glob Change Biol* 19: 1470-1481

Leuzinger S, Luo Y Q, Beier C, Dieleman W, Vicca S, Körner C (2011) Do global change experiments overestimate impacts on terrestrial ecosystems? *Trends Ecol Evol* 26: 236-241

Moser B, Metslaid M, Walthert L, Wasem U, Wohlgemuth T (2015) Verjüngungspotenzial verschiedener Waldföhren- und Fichtenherkünfte bei variabler Trockenheit. *Schweiz Z Forstwes* 166: 399–407

Moser B, Walthert L, Metslaid M, Wasem U, Wohlgemuth T (2017) Spring water deficit and soil conditions matter more than seed origin and summer drought for the establishment of temperate conifers. *Oecologia* 183: 519–530

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, sowie des Amtes für Wald und Naturgefahren, Kanton Graubünden. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf

Nussbaumer C, Wohlgemuth T (2016) Verbiss bremsst junge Flaumeichen. *Wald Holz* 01/16: 31-33

Piper F I, Fajardo A, Cavieres L A (2013) Simulated warming does not impair seedling survival and growth of *Nothofagus pumilio* in the southern Andes. *Perspect Plant Ecol Evol Syst* 15: 97-105

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, Dobbertin M, Bürgi M, Gimmi U, Graf Pannatier E, Gugerli F, et al. (2006) Verdrängen Flaumeichen die Walliser Waldföhren? Eidg Forschungsanstalt WSL, Merkblatt für die Praxis 41: 1-16

Scherrer D, Körner C (2011) Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. *J Biogeogr* 38: 406-416

Schleppi P, Bucher-Wallin I, Hagedorn F, Körner C (2012) Increased nitrate availability in the soil of a mixed mature temperate forest subjected to elevated CO₂ concentration (canopy FACE). *Glob Change Biol* 18: 757-768

Skrøppa T, Tollefsrud M M, Sperisen C, Johnsen O (2010) Rapid change in adaptive performance from one generation to the next in *Picea abies* - Central European trees in a nordic environment. *Tree Genet Genomes* 6: 93-99

Slavich E, Warton D I, Ashcroft M B, Gollan J R, Ramp D (2014) Topoclimate versus macroclimate: how does climate mapping methodology affect species distribution models and climate change projections? *Divers Distrib* 20: 952-963

von Arx G, Pannatier E G, Thimonier A, Rebetez M (2013) Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate. *J Ecol* 101: 1201-1213

Zimmermann N E, Bugmann H (2008) Die Kastanie im Engadin – oder was halten Baumarten von modellierten Potenzialgebieten? Schweiz Z Forstwes 159: 326-335

6 Anhang

Anhang 1

Moser B, Wasem U, Wohlgemuth T (2014) Verjüngung von Waldföhren und Fichten verschiedener Herkunft. Bündnerwald 6/2014: 34-36

Anhang 2

Moser B, Metslaid M, Walthert L, Wasem U, Wohlgemuth T (2015) Facilitation of Mediterranean trees in Central Europe: reality check under field conditions. Posterpräsentation an der 45. Jahrestagung der Gesellschaft für Ökologie, 31.8.–04.09.2015 in Göttingen

Anhang 3

Moser B, Metslaid M, Walthert L, Wasem U, Wohlgemuth T (2015) Verjüngungspotenzial verschiedener Waldföhren- und Fichtenherkünfte bei variabler Trockenheit. Schweiz Z Forstwes 166: 399–407

Anhang 4

Moser B, Walthert L, Metslaid M, Wasem U, Wohlgemuth T (2017) Spring water deficit and soil conditions matter more than seed origin and summer drought for the establishment of temperate conifers. Oecologia 183: 519–530