

# 20 Jahre Waldföhrensterben im Wallis: Rückblick und aktuelle Resultate

<b>Andreas Rigling</b>	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)* und Institut für terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich (CH)
<b>Barbara Moser</b>	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
<b>Linda Feichtinger</b>	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
<b>Holger Gärtner</b>	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
<b>Arnaud Giuggiola</b>	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
<b>Christian Hug</b>	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
<b>Thomas Wohlgemuth</b>	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

## 20 Jahre Waldföhrensterben im Wallis: Rückblick und aktuelle Resultate

Die Waldföhrenwälder in den tieferen Lagen des Oberwallis waren in den vergangenen 20 Jahren aufgrund von Absterbeprozessen wiederholt im Fokus des öffentlichen Interesses, und sie sind es aktuell gerade wieder. Wir nehmen die derzeitige Absterbewelle zum Anlass, um einen Überblick zu geben über die langjährige Entwicklung der Nadelverluste, des Wachstums und der Mortalität der Waldföhren in dieser trockenen Region. Es wird die Sensitivität dieser Wälder gegenüber Trockenheit und variierender Wasserverfügbarkeit aufgezeigt, und es werden Schlussfolgerungen für die Waldbewirtschaftung gezogen. Die Analyse basiert auf Resultaten der langfristigen Waldökosystemforschung und verschiedenen laufenden Experimenten sowie auf Jahrringuntersuchungen zur aktuellen Absterbewelle. Der Nadelverlust und die Mortalität verliefen in den untersuchten Flächen weitgehend parallel. Sie schwankten von Jahr zu Jahr stark, wobei sie jeweils in und nach Trockenjahren Höchstwerte zeigten. Zusammen mit biotischen Faktoren wie Bestandeskonkurrenz, Misteln, Schadinsekten und Krankheiten reduzierte die Trockenheit das Wachstum und brachte die Bäume zum Absterben. Die Resultate aus den Experimenten legen nahe, dass auf Trockenstandorten mit starken Durchforstungen, allenfalls auch mit kontrollierter Beweidung, der Wasserbedarf der Wälder reduziert, die Wirkung von Trockenperioden abgeschwächt und die Widerstandskraft der Bäume erhöht werden kann.

**Keywords:** drought year, field experiments, mortality, Scots pine, water regime, Valais, Switzerland  
**doi:** 10.3188/szf.2018.0242

\* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail [andreas.rigling@wsl.ch](mailto:andreas.rigling@wsl.ch)

Im Jahr 1999 publizierten Rigling & Cherubini in der Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen den Beitrag «Wieso sterben die Waldföhren im Telwald bei Visp?». Sie untersuchten das flächenhafte Absterben der Waldföhren vor dem Hintergrund der Vegetationsgeschichte, der Ökologie und der Bestandesdynamik der Waldföhrenwälder sowie der Immissionsgeschichte des Wallis. Sie konnten zeigen, dass viele verschiedene Faktoren zusammen die Waldföhren zum Absterben brachten. Neben der Bestandeskonkurrenz, die zu erhöhtem Wasserverbrauch und Trockenstress führt, waren immer noch weitere Faktoren beteiligt, zum Beispiel Insekten- oder Pilzbefall. Die Autoren gingen davon aus, dass die Mortalitätsraten der Waldföhre in Zukunft kaum sinken würden, da die verursachenden

Faktoren häufiger und stärker werden dürften. Diese Vermutung hat sich bestätigt, denn in regelmässigen Abständen verfärbten sich die Talflanken im Oberwallis rotbraun wegen Tausender frisch abgestorbener Waldföhren, so gerade auch heute (Abbildung 1).

Trockenheit und Baumsterben sind in den vergangenen 20 Jahren zu einem zentralen Thema in der Waldforschung und speziell in der Klimafolgenforschung geworden, nicht nur in der Schweiz, sondern weltweit. Während zu Beginn mehrheitlich über Absterbephänomene aus Trockengebieten berichtet wurde, nahmen in den letzten Jahren die Meldungen aus Wäldern der gemässigten, borealen und sogar der tropischen Zonen zu (Allen et al 2010, 2015; Galiano et al 2010; Williams et al 2013).



**Abb 1** Absterbewellen in den Waldföhrenwäldern im Zentralwallis. a) Telwald bei Visp, 1998; b) Grauberg bei Visp, 2004; c) Südhang unterhalb Lens, 2011; d) Grauberg bei Visp, 2017. Fotos: a) Beat Wermelinger, b–d) Andreas Rigling

Die aktuelle Absterbewelle in den Waldföhrenwäldern der Region Brig-Visp (Abbildung 1d) ist Anlass, die Walddynamik der vergangenen 20 Jahre in dieser trockenen Region zu diskutieren. Ausgehend von einem Überblick über die langjährige Entwicklung der Nadelverluste, des Baumwachstums und der Mortalität wird im Artikel die Sensitivität dieser Wälder gegenüber Trockenheit und variierender Wasserverfügbarkeit aufgezeigt, und es werden Schlussfolgerungen für die Waldbewirtschaftung gezogen.

## Methoden

Die Daten für den vorliegenden Artikel stammen von verschiedenen langfristigen Monitoringprojekten, mittel- und kurzfristigen Feldexperimenten und aktuellen Erhebungen zum Waldzustand.

### Langfristige Waldökosystembeobachtung in Visp und Lens

Das Programm «Langfristige Waldökosystemforschung»<sup>1</sup> untersucht den Zustand des Schweizer Waldes in einer sich verändernden Umwelt. Das Programm betreibt 19 Dauerbeobachtungsflächen, auf denen seit 1994 regelmässig Parameter zum Waldzustand und zum Waldwachstum erhoben werden. Die Flächen sind Teil der seit 1985 durchgeführten Sanasilva-Inventur, die den Kronenzustand bzw. den Nadelverlust der Bäume erfasst. Der Nadelverlust wird visuell auf 5% genau geschätzt mit 100% für

einen toten Baum ohne Nadeln und 0% für einen voll benadelten Baum (Dobbertin et al 2004).

Zwei der Monitoringflächen liegen bei Visp (680 m ü. M.) und Lens (1050 m ü. M.) im Wallis. Von der Vielzahl der erhobenen Messparameter wurde in dieser Studie nur der Nadelverlust der Waldföhren verwendet, der seit 1996 jeweils in den Monaten Juli und August erhoben wird. Für die Berechnung des mittleren jährlichen Nadelverlusts auf einer Untersuchungsfläche wurden nur die lebenden Bäume berücksichtigt. Die jährliche Mortalität wurde als Anteil der Bäume mit 100% Nadelverlust an der Gesamtzahl der untersuchten Bäume berechnet. Nadelverlust und Mortalität wurden mit der klimatischen Wasserbilanz vom Oktober des Vorjahres bis August des laufenden Jahres verglichen. Die klimatische Wasserbilanz entspricht der Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung (Thornthwaite 1948). Sie ist ein Trockenheitsmass, das sowohl die Wasserverfügbarkeit durch Niederschlag als auch den Wasserverlust der Pflanzen durch die von der Temperatur abhängigen Transpiration berücksichtigt. Die monatlichen Temperatur- und Niederschlagsdaten wurden von MeteoSchweiz (Stationen Visp, Sion) und Meteotest (Interpolation von Swisismetnet-Daten für den Standort Lens) zur Verfügung gestellt.

<sup>1</sup> Weiterführende Informationen: [www.wsl.ch/de/wald/waldentwicklung-und-monitoring/langfristige-waldoekosystemforschung-lwf.html](http://www.wsl.ch/de/wald/waldentwicklung-und-monitoring/langfristige-waldoekosystemforschung-lwf.html) (22.5.2018)

### **Aktuelle Erhebung der Absterbewelle 2016–2017 in Brig-Visp**

Seit Oktober 2016 ist in den Waldföhrenwäldern der Region Brig-Visp-Stalden-Turtmann eine neue Absterbewelle zu beobachten. Die Mortalität tritt, wie schon in früheren Jahren (Rigling et al 2013), konzentriert in den tieferen Höhenlagen (unterhalb ca. 1000 m ü. M.) auf. Betroffen ist hauptsächlich die namensgebende Baumart, die Waldföhre. Für diese Studie wurden die Jahrringbreiten der abgestorbenen und der lebenden Föhren gemessen und verglichen. Neben der Rolle der Trockenheit sollte untersucht werden, ob die abgestorbenen Föhren schon in den Jahren vor dem Tod geschwächt waren. In Zusammenarbeit mit dem kantonalen Forstdienst und den Forstbetrieben von Brig und Visp wurden im Juni 2017 68 adulte Waldföhren gefällt, 38 abgestorbene sowie 30 lebende ohne Schadenssymptome. Von allen Bäumen wurde je eine Stammscheibe entnommen, und es wurden die Jahrringbreiten gemessen. Zudem wurden von einzelnen Prohebäumen Mikroschnitte angefertigt, um das Zellwachstum genauer zu untersuchen.

### **Bewässerungsexperiment Pfywald**

Um die mittel- bis langfristigen Auswirkungen von Dürreperioden auf Wälder besser zu verstehen, richtete ein Team der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) im Jahr 2003 ein auf 20 Jahre angelegtes Experiment im Pfywald, dem grössten zusammenhängenden Föhrenwald der Schweiz, ein (Dobbertin et al 2010). Die Jahresmitteltemperatur beträgt dort 9.2 °C, die jährliche Niederschlagssumme 657 mm (Durchschnitt 1961–1990). Die Föhren der Oberschicht sind im Mittel etwa 100 Jahre alt und 10.8 m hoch. Das 1.2 ha grosse Versuchsfeld mit 876 dominanten Bäumen ist in acht Teilflächen von je 1000 m<sup>2</sup> aufgeteilt. Zwischen April und Oktober werden vier davon mit Sprinkleranlagen bewässert und erhalten jährlich zusätzlich 700 mm Niederschlag, was in etwa einer Verdoppelung der Jahresniederschläge entspricht. Die Bäume in den anderen vier Teilflächen wachsen unter natürlichen, also im Vergleich zu anderen Waldföhrenwäldern in der Schweiz sehr trockenen Bedingungen. Von den vielfältigen Daten, die in diesem Langzeitexperiment erhoben werden, wurden die jährlichen Mortalitätsraten sowie das mittels Dendrometerbändern erfasste intraannuelle Durchmesserwachstum der Jahre 2010 bis 2013 verwendet.

### **Durchforstungsexperiment Pfywald**

Ebenfalls im Pfywald liegt auch ein langfristiges Durchforstungsexperiment, das 1965 durch Prof. H. Leibundgut (ETH Zürich) angelegt wurde. Der betreffende Bestand hatte 2010 eine Baumhöhe von 10 bis 12 m, eine Grundfläche von 38 m<sup>2</sup>/ha und ein Alter von 95 Jahren (Giuggiola et al 2013). Er

wurde 1965, 1971, 1978 und 2010 durchforstet, mit jeweils drei unterschiedlichen Eingriffsstärken (Reduktion der Grundfläche um 14%, 40% und 68%). Zusätzlich wurden Kontrollflächen ohne Eingriffe angelegt. Die Eingriffe wurden auf insgesamt zwölf Teilflächen (30 × 30 m) ausgeführt, pro Eingriffsvariante jeweils mit drei Wiederholungen (Giuggiola et al 2013). Der Effekt der Durchforstungen auf das intraannuelle Durchmesserwachstum der Bäume wurde mittels Dendrometerbändern während vier Jahren (2010–2013) erhoben.

### **Unterwuchsentfernungsexperiment**

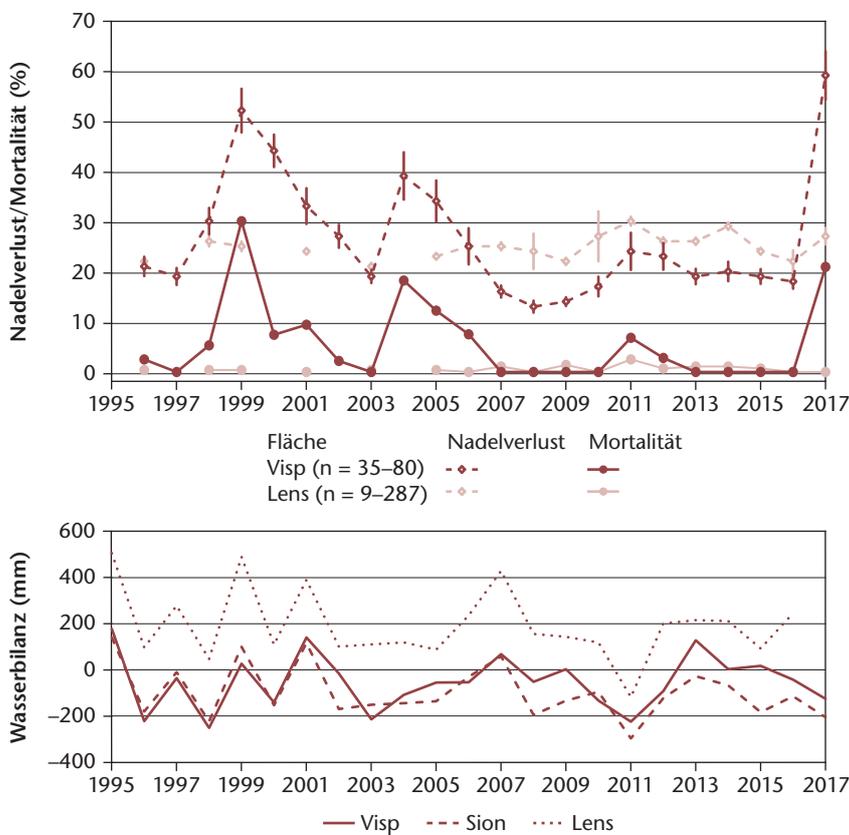
#### **Salgesch**

Im Wallis wurden die Wälder vielerorts während Jahrhunderten hauptsächlich mit Ziegen und Schafen beweidet. Dies hatte unter anderem zur Folge, dass die Kraut- und die Strauchschicht stark reduziert wurden (Gimmi et al 2010). Seit etwa den 1950er-Jahren wird die Waldweide jedoch nicht mehr geduldet, womit sich der Unterwuchs wieder voll entwickeln kann. Um den Effekt des Unterwuchses auf den Wasserhaushalt und das Wachstum der Bäume der Oberschicht abzuschätzen, wurde in einem lockeren Föhrenbestand (Baumhöhe maximal 15 m) mit sehr dichtem Unterwuchs in Salgesch im Bereich von sechs geschwächten dominanten Waldföhren die gesamte Kraut- und Strauchschicht auf einer Kreisfläche von 80 m<sup>2</sup> (r = 5 m) während vier Jahren (2010–2013) wiederholt entfernt. Dies dürfte einer langjährigen Beweidung durch Ziegen oder einer sehr radikalen Niederdurchforstung entsprechen. Um weitere sechs Bäume wurden keine Eingriffe vorgenommen (Kontrolle). In den Behandlungs- und Kontrollflächen wurden Bodentemperatur und -feuchte gemessen, und an den Testbäumen wurden verschiedene physiologische Parameter erhoben. Unter anderem wurde wiederum das intraannuelle Durchmesserwachstum mittels Dendrometerbändern gemessen (Giuggiola et al 2018).

## **Resultate und Diskussion**

### **Monitoring von Nadelverlust und Mortalität**

Nadelverluste sind eine integrale Grösse zur Messung der Vitalität von Bäumen (Dobbertin et al 2004). Neben dem Wachstum sind Mortalitätsraten gut geeignet, um den Erfolg von Bäumen in einer sich verändernden Umwelt abzuschätzen. Auf den beiden Monitoringflächen Visp und Lens verlaufen der Nadelverlust und die Mortalität der Waldföhren seit 1996 weitgehend parallel. In Visp gab es vier klare Maxima von Nadelverlust in den Jahren 1999, 2004, 2011 und 2017, die alle auf ein oder mehrere Jahre mit deutlich negativer Wasserbilanz folgten (Abbildung 2). Abgesehen von diesen Höchstwerten in Visp lag der Nadelverlust in beiden Flächen bei



**Abb 2** Zeitliche Entwicklung des Nadelverlustes und der Mortalität der Waldföhren auf den Monitoringflächen Visp und Lens (oben) sowie der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag minus potenzielle Verdunstung von Oktober des Vorjahres bis August des laufenden Jahres) der Meteostationen Visp und Sion (1995–2017) und Interpolation für den Standort Lens (1995–2016; MeteoSchiweiz, Swisismetnet; unten). n: Anzahl untersuchter Bäume (von Aufnahme zu Aufnahme stark schwankend).

20 bis 30% und die Mortalität nahe null, sodass über die Jahre kein Trend erkennbar ist. Die Datenreihe von Lens ist nicht vollständig, insbesondere die auf die extreme Sommertrockenheit von 2003 folgende Aufnahme von 2004 fehlt. Es fällt jedoch auf, dass in Lens anders als in Visp weder 1999 noch 2017 erhöhte Nadelverluste und Mortalitätsraten gemessen wurden. Dies dürfte auf insgesamt weniger trockene Wachstumsbedingungen zurückzuführen sein (Abbildung 2, unten). Generell waren die vergangenen zwei Jahrzehnte in den Tieflagen des Oberwallis mehrheitlich trocken, mit negativen Wasserbilanzen von Oktober bis August in 15 (Visp), bzw. 19 (Sion) von insgesamt 23 Jahren.

Der zeitliche Verlauf der Nadelverluste stimmt gut mit demjenigen der schweizweiten Sanasilva-Inventur überein, der über die Jahre ebenfalls stark schwankt und Höchstwerte jeweils in und nach Trockenjahren aufweist (Wohlgemuth et al 2015). Der enge Zusammenhang zwischen Nadelverlusten und Trockenheit offenbarte sich auch im Pfywald, wo mit einsetzender Bewässerung die Nadelverluste deutlich abnahmen (Eilmann et al 2013). Auch in einer europäischen Studie (Carnicer et al 2011) konnte gezeigt werden, dass die Benadelung bzw. Belaubung stark vom Wasserangebot abhängig ist. Deutlich ge-

ringer war sie dabei nicht nur in Trockenjahren, sondern ganz grundsätzlich im trockenen, mediterranen Raum im Vergleich zu den feuchteren nördlichen Gebieten Europas.

In einer landesweiten Untersuchung zur Baumsterblichkeit auf langfristigen Monitoringplots konnten Etzold et al (2016) keinen einheitlichen Trend bei den wichtigsten Baumarten feststellen. Eine Ausnahme bildeten die tief gelegenen Waldföhrenwälder im Wallis sowie im Schweizer Mittelland, insgesamt 22 Standorte, in denen die Mortalität seit den 1980er-Jahren zunimmt. Auch in der Region Chur konnte in den letzten Jahrzehnten wiederholt eine erhöhte Waldföhrenmortalität beobachtet werden. Unsere Resultate legen nahe, dass sich dieser Anstieg hauptsächlich durch gehäuft auftretende Trockenjahre erklären lässt.

Die gute Übereinstimmung zwischen Nadelverlust und Mortalität (Abbildung 2, oben) bedeutet, dass jeweils im Zuge von Trockenjahren die Nadelmasse reduziert wird (Solberg 2004) und sich dadurch die Widerstandskraft der Bäume gegenüber weiteren abiotischen sowie biotischen Stressfaktoren verringert (Rouault et al 2006). Dies hat zur Folge, dass stark geschwächte Individuen absterben. Immergrüne Nadelbäume benötigen mehrere Jahre, um die abgestossene Nadelmasse zu ersetzen und wieder die ursprüngliche Fotosyntheseleistung zu erbringen. Deshalb reduzieren aufeinanderfolgende Trockenjahre die Regenerationsfähigkeit der Waldföhre und erhöhen ihr Absterberisiko (Bigler et al 2006). Die ausserordentlich hohen Mortalitätsraten nach den Trockenjahren 1996, 1998 sowie 2003 bis 2005 in Visp (Abbildung 2, oben) bestätigen diese Aussage.

### Rekonstruktion des Baumwachstums absterbender Waldföhren

Das Jahrringwachstum von Gehölzpflanzen wird durch sämtliche am Wuchsort wirkenden Umweltfaktoren beeinflusst. Einschränkende Faktoren wie Frost, Trockenheit, Schädlinge, Krankheiten und hohe Vegetationskonkurrenz bewirken die Bildung von schmalen Jahrringen, während günstige Umweltbedingungen das Wachstum stimulieren und zur Bildung von breiteren Jahrringen führen (Schweingruber 1996). Die Messung der Jahrringabfolgen im Holz ermöglicht somit die Rekonstruktion vergangener Umweltzustände. Der Vergleich des Jahrringwachstums der noch lebenden mit den kürzlich abgestorbenen Waldföhren in der Region Brig-Visp zeigte während Jahrzehnten einen äusserst synchronen Verlauf (Abbildung 3). Erst nach dem Trockenjahr 1998 reduzierte sich das Wachstum der später absterbenden Bäume im Vergleich zu den weiterlebenden. Die Schere öffnete sich dann weiter nach den Trockenjahren 2003 bis 2005 und der extremen Frühjahrstrockenheit 2011. Ab 2013 war das Wachs-

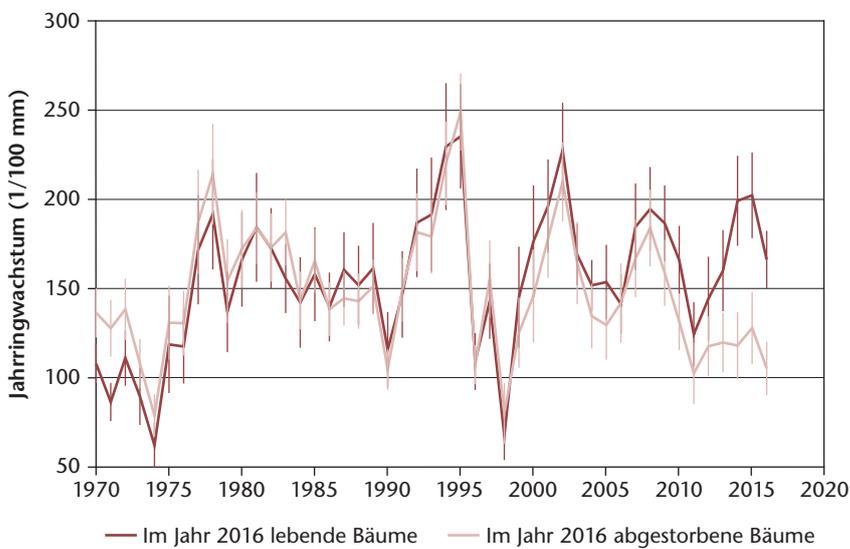


Abb 3 Mittleres Jahrringwachstum von 30 lebenden und 38 abgestorbenen Waldföhren aus der Region Brig-Visp bis 2016.

tum der heute toten Bäume signifikant geringer als dasjenige der lebenden Bäume. Die extreme Trockenheit in der zweiten Jahreshälfte 2016 führte letztlich zur aktuell zu beobachtenden Absterbewelle (Abbildung 1d).

Dieser schwächende, das Absterben einleitende Einfluss von Trockenjahren konnte auch für tote Waldföhren im Pfywald (Timofeeva et al 2017) und in Nordspanien (Camarero et al 2015) sowie für die Nusskiefer (*Pinus edulis*) in New Mexico, USA, (Macalady & Bugmann 2014) nachgewiesen werden.

Die Betrachtung des Mikroschnittes einer im Jahr 2016 abgestorbenen Waldföhre aus Visp verdeutlicht die Absterbedynamik (Abbildung 4): Von 1991 bis 2002 sind normal breite Jahrringe ausgebildet worden. Einzig in den beiden Trockenjahren 1996 und 1998 waren die Jahrringe schmal. Ab den aufeinanderfolgenden Trockenjahren 2003 bis 2005 war das Wachstum dann aber reduziert, und das Spätholz war deutlich schmaler, mit Minima in den Jahren 2003, 2004, 2011 und 2015. Im Jahr 2016 schliesslich, dem Todesjahr, bildete der Baum zwar noch Frühholz, im Verlauf des trockenen Sommers, noch vor der Spätholzbildung, starb er dann aber ab.

Extreme und aufeinanderfolgende Trockenjahre zeigen sich also auch in der aktuellen Absterbedynamik in den Walliser Waldföhrenwäldern als entscheidender, auslösender Faktor. Zum Absterben

tragen dann aber oftmals noch andere Faktoren bei. Dazu gehören Schadinsekten, wobei deren Auftreten regional stark variiert (Wermelinger et al 2018, dieses Heft) sowie die Föhrenmistel (*Viscum album* ssp. *austriacum*) und Pilzkrankheiten, die in früheren Untersuchungen als wichtige biotische Schwächefaktoren identifiziert wurden (Dobbertin & Rigling 2006, Heiniger et al 2011), zu denen aber keine aktuellen Daten vorliegen.

### Experimente demonstrieren Möglichkeiten zur Reduktion von Trockenstress

Im Bewässerungsexperiment im Pfywald wird der Effekt von Trockenheit und verbesserter Wasserverfügbarkeit auf das Funktionieren eines ganzen Ökosystems untersucht. Das Experiment hebt sich dabei nicht nur in Bezug auf seine Grösse (gegen 900 dominante Waldföhren), sondern auch in Bezug auf seine Langfristigkeit (Laufzeit 20 Jahre) von den üblichen Feldexperimenten ab. Wie bereits Leuzinger et al (2011) festhalten, ist deren Laufzeit (meist zwei bis vier Jahre) in der Regel zu kurz, um die oftmals nicht linear verlaufenden Ökosystemreaktionen erfassen zu können. Es besteht damit die Gefahr, dass aus kurzfristigen Trends falsche Schlüsse gezogen werden. Die Entwicklung der Mortalität im Bewässerungsexperiment Pfywald (Abbildung 5) stützt die Feststellung von Leuzinger et al (2011) vollumfänglich. Zwar ist eindeutig erkennbar, dass die Bewässerung die jährlichen Absterberaten ab dem zweiten Versuchsjahr konsistent reduzierte, doch ist der Effekt in den einzelnen Jahren markant unterschiedlich: Zu Beginn des Experimentes war der Effekt trotz der Trockenjahre 2003 bis 2005 verhältnismässig gering. Anschliessend (2008 bis 2011) trat dann sowohl in den bewässerten als auch in den unbewässerten Flächen praktisch keine Mortalität auf. Ab dem Jahr 2012 schliesslich waren die Bewässerungseffekte gross. Über die ganze Zeitdauer, von 2003 bis 2017, betrug die kumulative Mortalität bei den unbewässerten, dem natürlichen Klima ausgesetzten Bäumen 22%, während bei den bewässerten Bäumen lediglich 9%, also weniger als die Hälfte, abstarben.

In diesem Experiment wurde der Trockenstress reduziert, indem den Bäumen mittels Bewässerung mehr Wasser zur Verfügung gestellt wurde. Dies ist

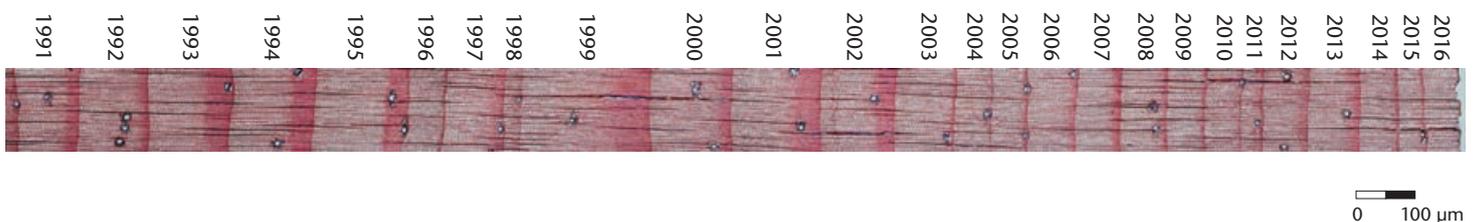
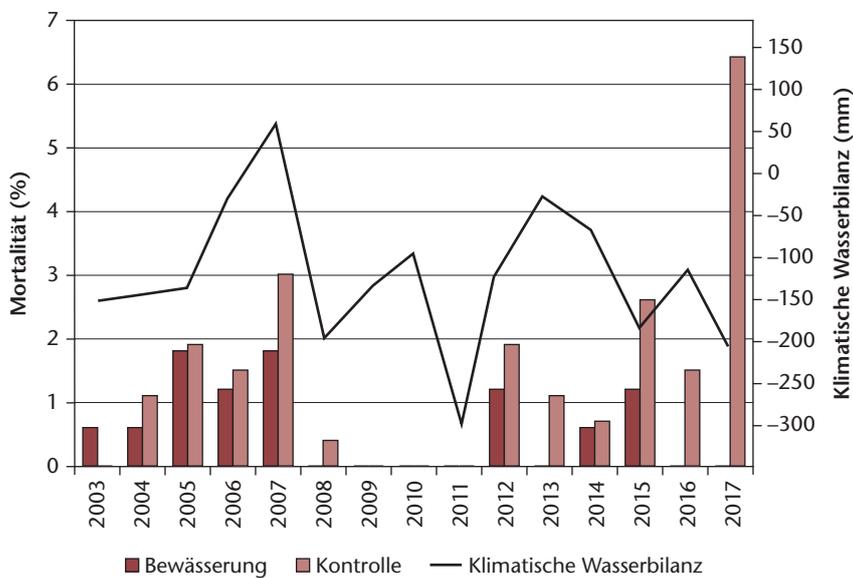


Abb 4 Mikroschnitt einer 2016 abgestorbenen, 105 Jahre alten Waldföhre. In den Trockenjahren 1996, 1998, 2003, 2004, 2005 und 2011 sind die Jahrringe schmal, und sie weisen kaum Spätholz (dunkelrot) auf. Im Trockenjahr 2016 wurde dann gar kein Spätholz mehr angelegt.



**Abb 5** Entwicklung der Mortalität der Waldfähren in der Oberschicht im Bewässerungsexperiment Pfywald. Schwarz eingezeichnet ist die klimatische Wasserbilanz der Kontrollflächen (unbewässert).

in grossem Stil nicht praktikabel. Jedoch könnte im Rahmen des Waldbaus versucht werden, den Wasserbedarf eines Waldbestandes zu reduzieren, beispielsweise durch die Veränderung der Baumartenzusammensetzung (Lévesque et al 2015), durch die Optimierung der Bestandesstruktur (Seidl et al 2011) oder durch die Reduktion der Bestandesdichte (Sohn et al 2016a, Bottero et al 2017, Bose et al 2018) mithilfe von Hoch- oder Niederdurchforstungen.

Im Durchforstungsexperiment im Pfywald wurde je nach Eingriffsstärke nicht nur das Wachstum der verbleibenden Bäume gefördert, sondern auch die Mortalität signifikant reduziert und somit die Widerstandskraft gegenüber der Trockenheit erhöht (Giuggiola et al 2013, 2016). Zum gleichen Resultat führten Durchforstungsexperimente auf trockenen Standorten in Deutschland mit Waldföhre (Sohn et al 2016b) und in den USA mit Gelbkiefer

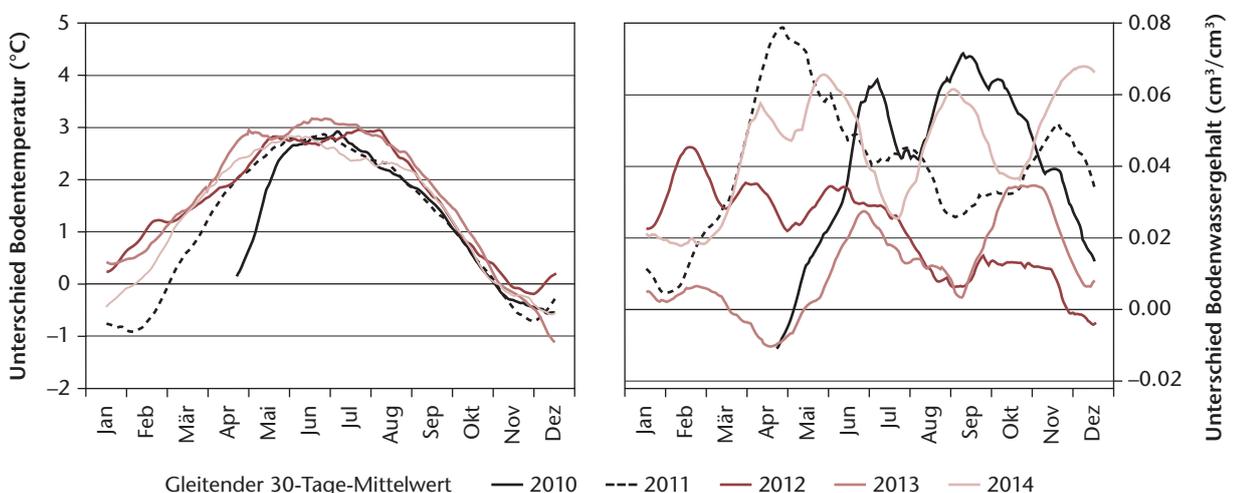
(*Pinus ponderosa* [Lawson & C. Lawson]) und Rotkiefer (*Pinus resinosa* [Aiton]; Bottero et al 2017).

In der strahlungsintensiven Südlage von Salgesch führte die Unterwuchsentfernung dazu, dass sich der Boden bis in 60 cm Tiefe erwärmte. Gleichzeitig erhöhte sich aber auch der Bodenwassergehalt bis in die gleiche Tiefe (Abbildung 6). Auf diese Veränderungen im Hauptwurzelraum reagierten die untersuchten Waldfähren unmittelbar mit einer Reduktion des Baumwasserdefizits, einer Erhöhung des Saftflusses und mit einer bis zu 4.6-fachen Steigerung des Durchmesserwachstums (Giuggiola et al 2018).

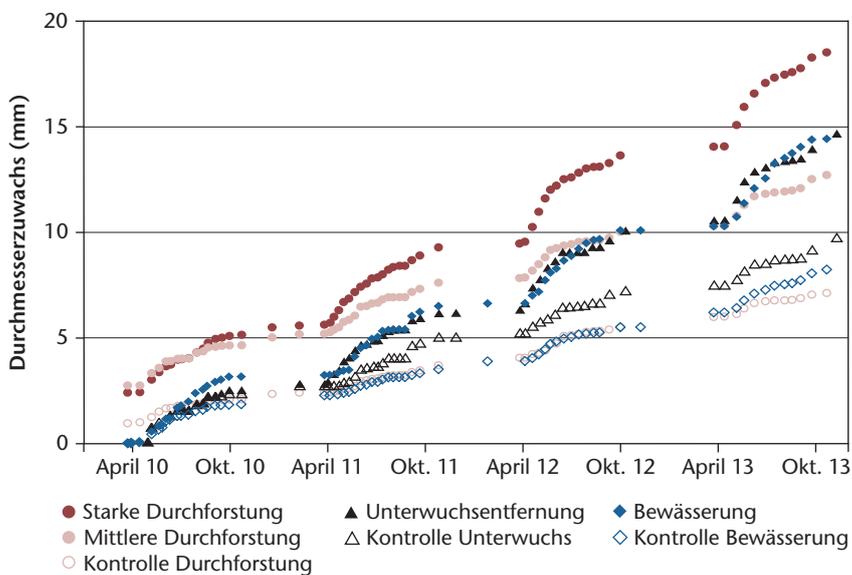
Vergleicht man den Effekt der oben genannten Experimente, zeigt sich, dass alle drei Behandlungsarten zu einer markanten Erhöhung des Durchmesserwachstums führten (Abbildung 7). Da die Experimente lediglich zwei Kilometer voneinander entfernt und sowohl die Böden als auch die Bestände sehr ähnlich sind, dürfen die Eingriffsarten auch unmittelbar miteinander verglichen werden. Das Durchmesserwachstum, das bei den Kontrollbäumen jeweils lediglich 2 bis 2.5 mm pro Jahr betrug, liess sich durch die Unterwuchsentfernung im Umkreis von 5 m um die Bäume um 50% steigern. Mit der mittleren Durchforstungsvariante (Reduktion der Grundfläche um 40%) betrug die Wachstumssteigerung 80% und mit der Bewässerung (Verdoppelung des Jahresniederschlags) 90%. Den grössten Effekt hatte die starke Durchforstungsvariante mit +150%. Allerdings wurde dabei die Grundfläche um 68% reduziert.

## Schlussfolgerungen aus 20 Jahren Forschung

Rigling & Cherubini (1999: 128) beschrieben die Rolle der Trockenheit in der Absterbedynamik der Waldföhrenwälder folgendermassen: *Trockenheit*



**Abb 6** Unterschied in der Bodentemperatur (links) und im Bodenwassergehalt (rechts) in 30 cm Tiefe zwischen den Flächen mit Unterwuchsentfernung und den Kontrollflächen im Jahresverlauf. Positive Werte bedeuten eine Erhöhung nach Unterwuchsentfernung im Vergleich zu den Kontrollflächen (aus Giuggiola et al 2018, verändert).



**Abb 7** Intraanneuelles Durchmesserwachstum 2010–2013 von Waldföhren im Durchforstungs- und im Bewässerungsexperiment (beide im Pfywald) sowie im Unterwuchsentfernungsexperiment (Salgesch).

ist sicher als Stressfaktor zu betrachten; sie kann aber nur im Zusammenhang mit anderen prädisponierenden Stressfaktoren wie z.B. Bestandeskonkurrenz oder Insekten- und Pilzbefall zu einem Problem für die Waldföhre werden. Die Rolle von Trockenheit wurde also damals erkannt und andiskutiert, doch konnte die vollumfängliche Tragweite wegen der spärlichen Datenlage und des weitgehenden Fehlens von vergleichbaren Studien nur erahnt werden. Heute können wir auf 20 Jahre Forschung zurückblicken und erkennen, dass insbesondere die aufeinanderfolgenden Trockenjahre in den Walliser Waldföhrenwäldern deutliche Spuren hinterlassen haben. Auch in der jüngsten Absterbewelle 2016/2017 spielten vorangehende Trockenjahre eine wichtige Rolle. Zusammen mit weiteren Faktoren führten sie zum Absterben der Bäume (Wermelinger et al 2018, dieses Heft). Trockenheit wirkt aber nicht nur auf die adulten Bäume ein, sondern auch auf die Waldverjüngung. Wie stark die Waldföhrenverjüngung durch trocken-heisse Bedingungen limitiert bzw. wie anpassungsfähig dieselbe ist, diskutieren Moser et al (2018) in diesem Heft.

Im Rahmen der fortschreitenden globalen Erwärmung sprechen Allen et al (2015) von zunehmend heisseren Trockenperioden (hotter droughts), die die Wirkung früherer Trockenheiten übertreffen dürften. Auch wenn in den vergangenen Jahrzehnten das Systemverständnis stark verbessert werden konnte und heute das Zusammenspiel der verschiedenen abiotischen und biotischen Einflussfaktoren grundsätzlich verstanden wird (Rigling et al 2006, Raffa et al 2008, Galiano et al 2010, Vacchiano et al 2011, Allen et al 2015), so muss bei zunehmend heisseren Bedingungen davon ausgegangen werden, dass sich die Wirkungsweise der einzelnen Stressfaktoren und deren Wechselwirkungen verändern werden.

Neue Wechselwirkungen sind auch aufgrund von (neu) eingeschleppten Organismen zu erwarten (z.B. Wermelinger 2014).

Die Resultate aus den Experimenten legen nahe, dass auf Trockenstandorten mit starken Durchforstungen, allenfalls auch mit kontrollierter Bewässerung, der Wasserbedarf reduziert, die Wirkung von Trockenjahren abgeschwächt und die Widerstandskraft der Wälder erhöht werden kann. Die positive Wirkung von starken Durchforstungen auf die Widerstandskraft gegenüber Trockenheit wird auch durch weitere Studien bestätigt (D'Amato et al 2013, Giuggiola et al 2013, Sohn et al 2016a, Elkin et al 2015, Bottero et al 2017). Da Eingriffe, die die Bestandesdichte reduzieren, aber auch negative Folgen haben können, zum Beispiel in Bezug auf den Schutz vor Steinschlag, gilt es, die möglichen Massnahmen entsprechend der jeweilig geforderten Waldleistung zu treffen (Rigling et al 2012). Auch Keenan (2015) und Seidl et al (2011) sehen Durchforstungen, neben der Anpassung der Baumartenzusammensetzung und der Verkürzung der Umtriebszeit, als Teil einer aktiveren Waldbewirtschaftung, die zumindest vorübergehend die Anpassungsfähigkeit der Wälder an sich ändernde Klimabedingungen erhöhen könnte.

Eingereicht: 19. Januar 2018, akzeptiert (mit Review): 22. Mai 2018

## Dank

Die aufwendigen Forschungsarbeiten konnten nur dank der langjährigen Unterstützung durch die Dienststelle für Wald, Flussbau und Landschaft des Kantons Wallis und insbesondere die Forstbetriebe «Forst Region Leuk», «Visp und Umgebung», «Stalden und Umgebung» und «Forstrevier Burgerschaft Brig-Glis» realisiert werden. Ein spezieller Dank geht an die Gemeinde Leuk und die Hydro-Exploitation SA, ohne deren Unterstützung das Bewässerungsexperiment im Pfywald nicht denkbar wäre, sowie an die Gemeinden Visp und Lens, die langjährige Partner des Programmes «Langfristige Waldökosystemforschung» sind. Ein grosses Dankeschön geht auch an die technischen Experten der WSL, speziell an Peter Bleuler, Ueli Wasem und Dieter Trummer, die Felddaufnahmeteams der langfristigen Waldökosystemforschung und der Ertragskunde, die die Experimente und Erhebungen durchführten, sowie an Anne Verstege, Daniel Nievergelt und Flurina Rigling für die Jahrringmessungen. Die Forschungsarbeiten wurden durch das Bundesamt für Umwelt, die Velux Stiftung, das Kompetenzzentrum Umwelt und Nachhaltigkeit des ETH-Bereiches, den Schweizerischen Nationalfonds, den Kanton Wallis und die WSL finanziell unterstützt.

## Literatur

- ALLEN CD, MACALADY A, CHENCHOUNI H, BACHELET D, MCDOWELL N ET AL (2010) Drought-induced forest mortality: a global overview reveals emerging climate change risks. For Ecol Manage 259: 660–684.
- ALLEN C, BRESHEARS DD, MC DOWELL N (2015) On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. Ecosphere 6: 1–55.
- BIGLER C, BRAEKER OU, BUGMANN H, DOBBERTIN M, RIGLING A (2006) Drought as inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. Ecosystems 9: 330–343.
- BOSE AK, NELSON AS, KANE M, RIGLING A (2018) Density reduction in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) stands to increase tree C assimilation: an approach with the dual  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  isotope signatures in needles. Ann For Sci 75: 8.
- BOTTERO A, D'AMATO AW, PALIK BJ, BRADFORD JB, FRAVER S ET AL (2017) Density-dependent vulnerability of forest ecosystems to drought. J Appl Ecol 54: 1605–1614.
- BRUNNER I, GRAF-PANNATIER E, FREY B, RIGLING A, LANDOLT W ET AL (2009) Morphological and physiological responses of Scots pine fine roots to water supply in a climatic dry area in Switzerland. Tree Physiol 29: 541–550.
- CAMARERO JJ, GAZOL A, SANGÜESA-BARREDA G, OLIVA J, VICENTE-SERRANO SM (2015) To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. J Ecol 103: 44–57.
- CARNICER J, COLLA M, NINYEROLAC M, PONSD X, SÁNCHEZ G ET AL (2011) Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. Proc Natl Acad Sci USA 108: 1474–1478.
- D'AMATO AW, BRADFORD JB, FRAVER S, PALIK BJ (2013) Effects of thinning on drought vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems. Ecol Appl 23: 1735–1742.
- DOBBERTIN M, HUG C, MIZOUÉ N (2004) Using slides to test for changes in crown defoliation assessment methods. Part I: visual assessment of slides. Environ Monit Assess 98: 295–306.
- DOBBERTIN M, RIGLING A (2006) Mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) contributes to the *Pinus sylvestris* L. decline in the Rhone Valley of Switzerland. For Pathol 36: 309–322.
- DOBBERTIN M, EILMANN B, BLEULER P, GIUGGIOLA A, GRAF PANNATIER E ET AL (2010) Effect of irrigation on needle, shoot and stem growth in natural drought exposed *Pinus sylvestris* forests. Tree Physiol 30: 346–360.
- 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.
- ELKIN C, GIUGGIOLA A, RIGLING A, BUGMANN H (2015) Short and long term efficacy of forest thinning to mitigate drought impacts in mountain forests. Ecol Appl 25: 1083–1098.
- ETZOLD S, WUNDER J, BRAUN S, ROHNER B, BIGLER C (2016) Mortalität von Waldbäumen: Ursachen und Trends. In: Plüss A, Augustin S, Brang P, editors. Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bern: Haupt. pp. 177–197.
- GALIANO L, MARTÍNEZ-VILALTA J, LLORET F (2010) Drought-induced multifactor decline of scots pine in the Pyrenees and potential vegetation change by the expansion of co-occurring oak species. Ecosystems 13: 978–991.
- GIMMI U, WOHLGEMUTH T, RIGLING A, HOFFMANN CW, 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. For Ecol Manage 310: 827–835.
- GIUGGIOLA A, OGÉE J, GESSLER A, RIGLING A, BUGMANN H ET AL (2016) Improvement of water and light availability after thinning at a xeric site: Which weights the more? A dual isotope approach. New Phytol 210: 108–121.
- GIUGGIOLA A, ZWEIFEL R, FEICHTINGER L, VOLLENWEIDER P, HAENI M ET AL (2018) Competition for water in a xeric forest ecosystem. Effects of understory removal on soil micro-climate, growth and physiology of dominant Scots pine trees. For Ecol Manage 409: 241–249.
- HEINIGER U, THEILE F, RIGLING A, RIGLING D (2011) Blue-stain infections in roots, stems and branches of declining *Pinus sylvestris* in a dry inner alpine valley of Switzerland. For Pathol 41: 501–509.
- KEENAN RJ (2015) Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. Ann For Sci 72:145–167.
- LEUZINGER S, LUO Y, BEIER C, DIELEMAN W, VICCA S ET AL (2011) Do global change experiments overestimate impacts on terrestrial ecosystems? Trends Ecol Evol 26: 236–241.
- LÉVESQUE M, RIGLING A, BRANG P (2015) Réponse à la sécheresse de conifères indigènes et exotiques: une étude dendro-écologique. Schweiz Z Forstwes 166: 372–379. doi: 10.3188/szf.2015.0372
- MACALADY AK, BUGMANN H (2014) Growth-mortality relationships in piñon pine (*Pinus edulis*) during severe droughts of the past century: shifting processes in space and time. PLoS One 9: e92770.
- MOSER B, BACHOFEN C, WOHLGEMUTH T (2018) Föhrenverjüngung: Plastizität und Akklimatisation in einem trockenere Klima. Schweiz Z Forstwes 169: 269–278. doi: 10.3188/szf/2018.0269
- RAFFA KF, AUKEMA BH, BENTZ BJ, CARROLL AL, HICKE JA ET AL (2008) Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions. BioScience 58: 501–517.
- RIGLING A, CHERUBINI P (1999) Wieso sterben die Waldföhren im «Telwald» bei Visp? Eine Zusammenfassung bisheriger Studien und eine dendroökologische Untersuchung. Schweiz Z Forstwes 150: 113–131. doi: 10.3188/szf.1999.0113
- RIGLING A, DOBBERTIN M, BÜRGI M, GIMMI U, GRAF PANNATIER E ET AL (2006) Verdrängen Flaumeichen die Walliser Waldföhren? Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL, Merkbl Prax 41. 16 p.
- RIGLING A, ELKIN C, DOBBERTIN M, GIUGGIOLA A, WOHLGEMUTH T ET AL (2012) Waldentwicklung in zentral-alpinen Trockentälern unter fortschreitendem Klimawandel – die Fallstudie Region Visp. Schweiz Z Forstwes 163: 481–492. doi: 10.3188/szf.2012.0481
- RIGLING A, BIGLER C, EILMANN B, MAYER P, GINZLER C ET AL (2013) Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests. Glob Chang Biol 19: 229–240.
- ROUAULT G, CANDAU JN, LIEUTIER F, NAGELEISEN LM, MARTIN JC ET AL (2006) Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. Ann For Sci 63: 613–624.
- SCHWEINGRUBER FH (1996) Tree rings and environment – dendro-ecology. Bern: Haupt. 609 p.
- SEIDL R, RAMMER W, LEXER MJ (2011) Adaptation options to reduce climate change vulnerability of sustainable forest management in the Austrian Alps. Can J For Res 41: 694–706.
- SOHN JA, SAHA S, BAUHUS J (2016A) Potential of forest thinning to mitigate drought stress: a meta-analysis. For Ecol Manage 380: 261–273.
- SOHN JA, HARTIG F, KOHLER M, HUSS J, BAUHUS J (2016B) Heavy and frequent thinning promotes drought adaptation in *Pinus sylvestris* forests. Ecol Appl 26: 2190–2205.
- SOLBERG S (2004) Summer drought: a driver for crown condition and mortality of Norway spruce in Norway. For Pathol 34: 93–104.
- THORNTHWAITE CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. Geogr Rev 38: 55–94.
- TIMOFFEEVA G, SIEGWOLF R, TREYDTE K, RIGLING A, SCHAUB M ET AL (2017) Long-term effects of drought on tree-ring growth and carbon isotope variability of Scots pine in an inner-Alpine valley in Switzerland. Tree Physiol 37: 1028–1041.

- VACCHIANO G, GARBARINO M, BORGOGNO MONDINO E, MOTTA R (2011) Evidences of drought stress as a predisposing factor to Scots pine decline in Valle d'Aosta (Italy). *Eur J For Res* 131: 989–1000.
- WERMELINGER B (2014) Invasive Gehölzinsekten: Bedrohung für den Schweizer Wald?. *Schweiz Z Forstwes* 165: 166–172. doi: 10.3188/szf.2014.0166
- WERMELINGER B, GOSSNER MM, SCHNEIDER MATHIS D, TRUMMER D, RIGLING A (2018) Einfluss von Klima und Baumvitalität auf den Befall von Waldföhren durch rindenbrütende Insekten. *Schweiz Z Forstwes* 169: 251–259. doi: 10.3188/szf.2018.0251
- WILLIAMS AP, ALLEN CD, MACALADY AK, GRIFFIN D, WOODHOUSE CA ET AL (2013) Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Clim Chang* 3: 8–13.
- WOHLGEMUTH T, CONEDERA M, ENGESSER R, WERMELINGER B, REINHARD M ET AL (2015) Waldschäden. In: Rigling A, Schaffer HP, editors. *Waldbericht 2015*. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Zustand. pp. 52–57.

## 20 ans de dépérissement du pin sylvestre en Valais: rétrospective et résultats actuels

Au cours des 20 dernières années, les forêts de pins sylvestres du Valais et les dépérissements qu'elles ont subis à basse altitude ont attiré à plusieurs reprises l'intérêt du grand public, et le suscitent à nouveau depuis peu. La vague de dépérissement observée actuellement nous a donné l'occasion de dresser un tableau de l'évolution à long terme de la défoliation, de la croissance et de la mortalité des pins sylvestres dans cette région sèche. Nous avons démontré la sensibilité de ces forêts à la sécheresse et à la variabilité de la disponibilité hydrique, ce qui nous a permis de tirer des conclusions en matière de gestion forestière. Notre analyse se base sur les résultats de la recherche à long terme sur les écosystèmes forestiers, sur les différentes expérimentations en cours et sur les analyses dendrochronologiques relatives à la vague de dépérissement actuelle. La défoliation et le taux de mortalité ont progressé de manière sensiblement parallèle dans les sites étudiés. Ils ont connu de fortes fluctuations interannuelles, atteignant des valeurs maximales pendant et après les années sèches. Conjointement aux facteurs biotiques tels que la concurrence au sein du peuplement, le gui, les ravageurs et les maladies, la sécheresse a réduit la croissance et provoqué la mort des arbres. Les résultats des expérimentations suggèrent que sur des sites secs, de fortes éclaircies, voire aussi un pâturage contrôlé, pourraient permettre de réduire le besoin en eau des forêts, d'amoindrir l'impact des périodes de sécheresse et d'augmenter la résistance des arbres.

## 20 years of Scots pine dieback in Valais (Switzerland): a retrospect and new results

Due to observed diebacks of Scots pine at lower elevations within the past 20 years and very recent events, forests in Upper Valais were repeatedly in the focus of public interest. In view of these developments, we want to summarize the past research on long-term changes in needle loss, growth and mortality of these dry Scots pine forests. The sensitivity of Scots pine trees to drought and varying water availability is presented and conclusions are drawn for forest management. The analyses are based on results of the long-term forest ecosystem research as well as ongoing experiments and tree-ring surveys related to the current dieback of Scots pine. The loss of needles was found to be highly related to tree mortality at all considered sites. Both parameters showed a high year-to-year variability, with highest needle losses and tree mortality rates in the drought year and the years following drought events. Beside the low water availability, biotic factors such as competition, mistletoe infection, insect outbreaks and diseases finally resulted in low tree growth and higher mortality. The results of the experiments suggest that on dry locations with heavy thinning, possibly also with controlled grazing, the water requirements of the forests can be reduced, the effect of dry periods weakened and the resistance of the trees increased.