



NCCR CLIMATE
Swiss Climate Research

u^b

b
**UNIVERSITÄT
BERN**

SALGESCH, JEIZINEN, IHRE WÄLDER UND DER GLOBALE KLIMAWANDEL

Ergebnisse und Berichte aus fünf Jahren Forschung des Instituts für Pflanzenwissenschaften
der Universität Bern



Inhaltsverzeichnis

- 3 Vorwort**
Salgesch, Jeizinen, ihre Wälder und der globale Klimawandel
- 4 Forschungsstationen**
Wie die Wälder von Salgesch und Jeizinen international bekannt wurden
- 6 Klimaänderung**
Die lokal unterschiedlichen Auswirkungen der globalen Klimaänderung
- 8 Feuer von Leuk**
Beim Waldbrand von Leuk flogen verkohlte Teilchen kilometerweit
- 10 Jahrringwachstum**
Jahrringwachstum hängt stärker vom Regen als von der Temperatur ab
- 10 Photosynthese**
Noch keine bleibenden Klimaschäden am Photosyntheseapparat der Flaumeiche
- 14 Stomataregulation**
Flaumeiche, Föhre und Wachholder reagieren unterschiedlich auf Trockenstress
- 16 Nachbarschaft**
Bei Hitze profitieren Flaumeichen von schattenspendenden Nachbarbäumen
- 18 Ultraschall-Signale**
Trockenstress lässt sich in Bäumen mittels Ultraschallsensoren erfassen
- 20 Misteln**
Mistelbefall sorgt bei Waldföhren für erhöhten Trockenstress
- 22 Dank**
Beteiligte Personen und Institutionen, Kontaktadressen
- 23 Wissenschaftliche Publikationen**

Salgesch, Jeizinen, ihre Wälder und der globale Klimawandel

Forschung findet häufig hinter verschlossenen Türen statt und bleibt Uneingeweihten deshalb oft ein Rätsel. Wer sich als Wissenschaftler aber für den Wald interessiert, kommt ganz automatisch in Kontakt mit der Bevölkerung. Bäume untersucht man nun einmal nicht im Labor. Das ist gut so, denn wir brauchen als Forscher die Auseinandersetzung mit der Öffentlichkeit. Schliesslich sehen wir unsere Arbeit nicht als Selbstzweck, sondern als gesellschaftlichen Auftrag.

Dieser Anspruch mag hin und wieder vergessen gehen. Bei den Projekten in Salgesch und Jeizinen jedoch ist er augenfällig: Wir sind alle unmittelbar von der Klimaänderung betroffen und teilen die Besorgnis um die Folgen eines sich wandelnden Klimas für Mensch und Umwelt.

Präzis diesen Fragestellungen widmet sich der Nationale Forschungsschwerpunkt Klima (NFS Klima), das Netzwerk der Schweizer Klimaforschung. Gegen 150 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten in diesem gross angelegten Programm. Ihr Ziel: Ursachen und Konsequenzen des Klimawandels besser zu verstehen. Derart komplexe Fragen können nicht einzelne Wissenschaftler lösen und auch keine Forschungsgruppen. Erst die gemeinsamen Anstrengungen der internationalen Forschungsgemeinschaft tragen Früchte. Das Wissen um das Zusammenspiel der verschiedenen Klimafaktoren wächst als Mosaik.

Steinchen ganz unterschiedlicher Art haben zu diesem Wissensmosaik auch die Forschungsprojekte in den Wäldern von Salgesch und Jeizinen beigetragen. Ein Vorhaben, das wir ohne die Unterstützung der lokalen Behörden und der Bevölkerung nicht hätten realisieren können. Wir danken deshalb allen Beteiligten für ihr Wohlwollen – und wir lösen ein Versprechen ein. Als wir im Frühling 2001 unsere ersten Messgeräte an Flaumeichen und Waldföhren in Salgesch und Jeizinen montierten, versprachen wir, die Menschen im Wallis an den Resultaten unserer Untersuchungen teilhaben zu lassen. Genau dazu ist die vorliegende Broschüre gedacht.

Roman Zweifel
Projektleiter *Tree Response to Climate Change*

Martin Grosjean,
Geschäftsleiter NFS Klima



Wie die Wälder von Salgesch und Jeizinen international bekannt wurden

Vom Frühling 2001 bis Ende 2004 betrieb das Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Bern zwei Messstationen zur Erforschung der Flaumeichen- und Föhrenwälder an den Südflanken des zentralen Wallis. Die für Schweizer Verhältnisse ausgesprochen trockenen Gebiete wurden gewählt, um zu erforschen, wie Bäume in Zukunft mit den zu erwartenden Klimaänderungen fertig werden. Die Resultate finden Eingang in wissenschaftliche Zeitschriften auf der ganzen Welt.

Roman Zweifel und Lukas Zimmermann

Wer verstehen will, wie Bäume funktionieren, muss all die unterschiedlichen Faktoren untersuchen, die auf ihr Gedeihen einwirken. Ein Baum bildet eine Art Brücke zwischen den beiden Medien Luft und Boden. Er leitet nährstoffreiches Wasser aus dem Boden in die Blätter und gibt das gefilterte Wasser gasförmig an die Luft ab. Aus der Luft entnimmt er Kohlendioxid (CO₂), das mit Hilfe von Sonnenlicht in Zucker umgewandelt wird und mit dem sich der Baum mit Energie und Baustoffen versorgt. So bestimmen die Eigenschaften von Luft und

Sekunden erhoben, nach zehn Minuten gemittelt und schliesslich gespeichert. Punktuell wurden zudem von Hand so genannte Blattwasserpotentiale gemessen. Erst die Kombination von über vier Jahre kontinuierlich erhobenen klimatischen sowie physiologischen Daten ermöglichten Schlussfolgerungen, wie unterschiedliche Baumarten auf die sich verändernden Klimabedingungen reagieren.

Das Herz der Forschungsstationen bildete je ein so genannter Datalogger, ein Gerät, das Messungen auf-



Abbildung 1. a) Meteostation Salgesch, b) Meteostation Jeizinen, c) Elektronisches Herz der Stationen mit Datalogger und Batterie, d) Granier Wasserfussensoren an einem Eichenstamm, e) Dendrometer zur Messung der Stammradiusänderungen.

Boden den Lebensverlauf einer Pflanze. Der Wasserhaushalt, der Gaswechsel aber auch die Nährstoffaufnahme eines Baums sind stark von diesen unmittelbaren Umgebungsbedingungen abhängig. Sie prägen die Entwicklung der Pflanze und entscheiden letztlich auch über Leben und Tod eines Baumes.

Hightech-Messungen im Sekundentakt

Diesem Grundprinzip des pflanzlichen Lebens trug der Versuchsaufbau der beiden Forschungsstationen in Salgesch und Jeizinen Rechnung. Wir erfassten damit einerseits die klimatischen Faktoren in Luft und Boden und verfolgten andererseits die physiologischen Reaktionen der Bäume auf die sich verändernden Umweltbedingungen. Kontinuierlich aufgezeichnet wurden die klimatischen Grössen Temperatur, Feuchtigkeit, Lichteinstrahlung, Windgeschwindigkeit und Niederschlag, sowie die biologischen Merkmale Wasserflussrate und Veränderungen des Stammradius. Aus diesen Daten konnten wir die potentielle sowie die tatsächliche Transpiration berechnen und daraus den Öffnungsgrad der Stomata - der Spaltöffnungen der Pflanzenblätter, die zur Aufnahme von CO₂ und Abgabe von Wasser dienen - von einzelnen Baumindividuen ableiten. Diese automatisierten Messungen wurden alle zehn

zeichnet, Sensoren steuert und den Energiehaushalt der Station reguliert (Abbildung 1). Über ein Daten-Natel konnte die Steuerung von einem Computer am Institut für Pflanzenwissenschaften in Bern aus überwacht und neu programmiert werden. Auch die Messdaten liessen sich aus Distanz abrufen. Die beiden High-Tech-Messstationen wurden mit Energie aus einem 100 Watt Solarpanel versorgt. Knapp 50 Messsensoren lieferten auf diesem Weg ihre Messwerte von Salgesch und Jeizinen nach Bern (Abbildung 2).

Verteilung der Baumarten auf den Versuchsflächen

Als Versuchsstandorte wählten wir südexponierte Lagen im zentralen Wallis, die leicht unterschiedliche Trockenstressgrade aufweisen, aber mit demselben Vegetationstyp bedeckt waren. Dominierend sind Flaumeiche (*Quercus pubescens*), Waldföhre (*Pinus silvestris*) und zwei Wachholderarten (*Juniperus communis* und *Juniperus sabina*).

In Salgesch besteht die steppenartige Vegetation aus Baumgruppen, die nicht höher als fünf Meter wachsen und die wie Inseln von Grasflächen und nacktem Fels umgeben sind. Die Hangneigung beträgt rund 25°, der Boden über dem kalkhaltigen Fels ist flachgründig und hat ausgesprochen schlechte Wasserspeicher-

Tabelle 1. Anzahl Bäume pro Baumart und Versuchsfläche an den Standorten Salgesch und Jeizinen.

Anzahl Bäume	Station Salgesch	Fläche Salgesch	Station Jeizinen
	400 m ²	16800 m ²	400 m ²
<i>Quercus pubescens</i>	87 (59%)	3608 (70%)	47 (43%)
<i>Pinus silvestris</i>	43 (29%)	215 (4%)	13 (12%)
<i>Juniperus spp.</i>	17 (11%)	1110 (22%)	28 (26%)
<i>Picea abies</i>	0 (0%)	0 (0%)	9 (8%)
andere	2 (1%)	208 (4%)	12 (11%)

eigenschaften.

In Jeizinen wachsen dieselben Baumarten bedeutend höher (15-20 m) und das Kronendach des Waldes bildet

eine gleichmäßigere, stärker geschlossene Struktur. Dies ist in erster Linie auf den tieferen Boden zurückzuführen, der auch in Trockenperioden eine bessere Wasserversorgung gewährleistet. Die Hangneigung beträgt rund 30°. Zusätzlich zu Flaumeiche, Föhre und Wachholder wächst in diesem Gebiet auch die feuchte liebende Fichte (*Picea abies*).

In beiden Untersuchungsgebieten wurden auf einer Fläche von je 400 m² (20 x 20 m) alle Stämme mit mehr als 2 cm Durchmesser auf 50 cm Höhe vermessen und kartiert (Abbildung 2). Zusätzlich zu diesen Aufnahmen wurden in Salgesch nach derselben Methode ein Gebiet von 16'800 m² vermessen. Insgesamt waren dies mehr als 5000 Bäume. Detaillierte Angaben zur Artenverteilung in den verschiedenen Forschungsflächen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

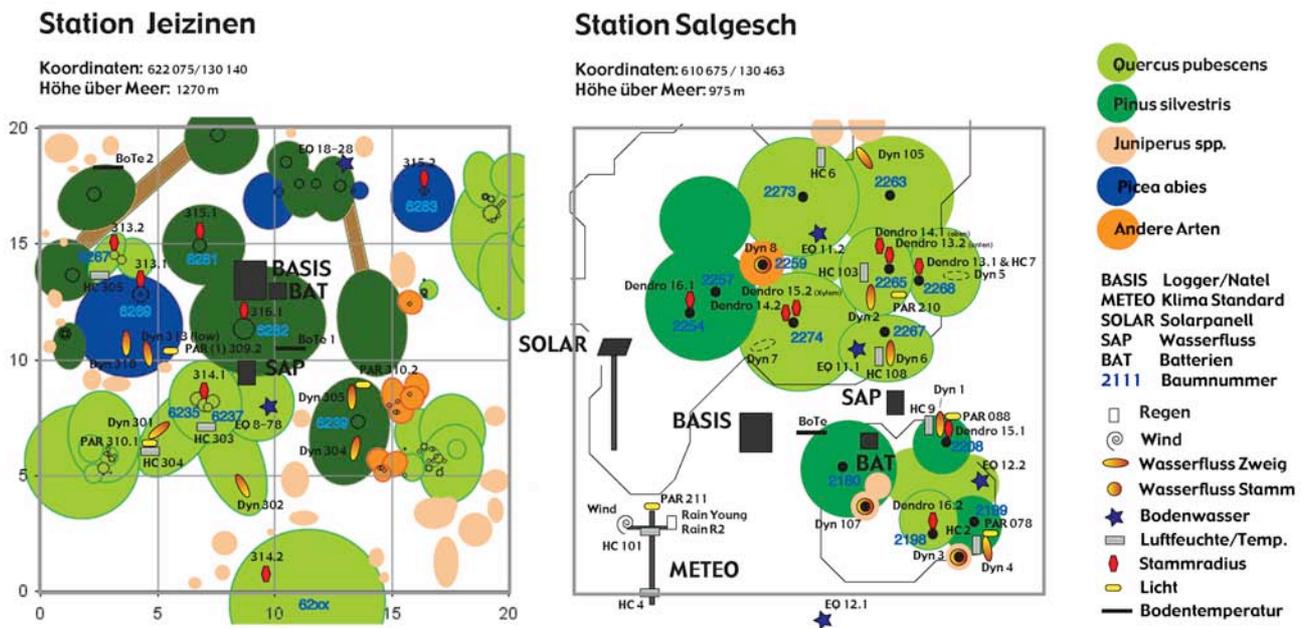


Abbildung 2. Übersicht der Baumarten- und Sensorverteilung in den beiden Messstationen Salgesch und Jeizinen. Mikroklimatische Messungen inner- und ausserhalb der Baumkronen führten zu detaillierten Klimaprofilen für die Vegetation. Wasserflüsse und Radiusänderungen wurden an Stämmen und Zweigen gemessen.

Die lokal unterschiedlichen Auswirkungen der globalen Klimaänderung

Die globale Klimaänderung ist auch im Wallis spürbar. Die Temperatur hat hier mit 1.5°C über die letzten hundert Jahre gar stärker zugenommen als im weltweiten und schweizerischen Mittel. Die Niederschlagssumme stieg in derselben Periode hingegen nur leicht an. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation zu beurteilen, sind nicht die Jahresmittelwerte von Bedeutung, sondern die jahreszeitlichen Veränderungen und die Häufigkeit von Extremereignissen.

Lukas Zimmermann und Roman Zweifel

In der Schweiz gibt es zehn, von MeteoSchweiz betriebene, Messstationen, die seit etwa 1860 ohne Unterbruch Temperaturwerte und Niederschlagsmengen aufzeichnen. Eine dieser Stationen steht in Sion, was direkte Vergleiche zwischen der Klimaänderung im Wallis, in der übrigen Schweiz und auf der ganzen Welt ermöglicht. Dass sich das Klima ändert, steht heute ausser Frage. Wichtigster Grund für den Wandel sind die gestiegenen Konzentrationen an Treibhausgasen in der Atmosphäre, durch die mehr Sonnenenergie auf der

im Jahresmittel einen Temperaturanstieg von 1.5°C und liegen sowohl im Sommer- wie im Winterhalbjahr gar noch etwas über den Werten der anderen Schweizer Stationen.

Bis Ende der 1970er Jahre veränderten sich die Jahresmitteltemperaturen wenig. Danach fand ein starker Temperaturanstieg statt, der bis heute anhält. Der Verlauf der Temperaturkurve von Sion über die letzten 100 Jahre ist typisch für alle Messungen in der Schweiz (Abbildung 1).

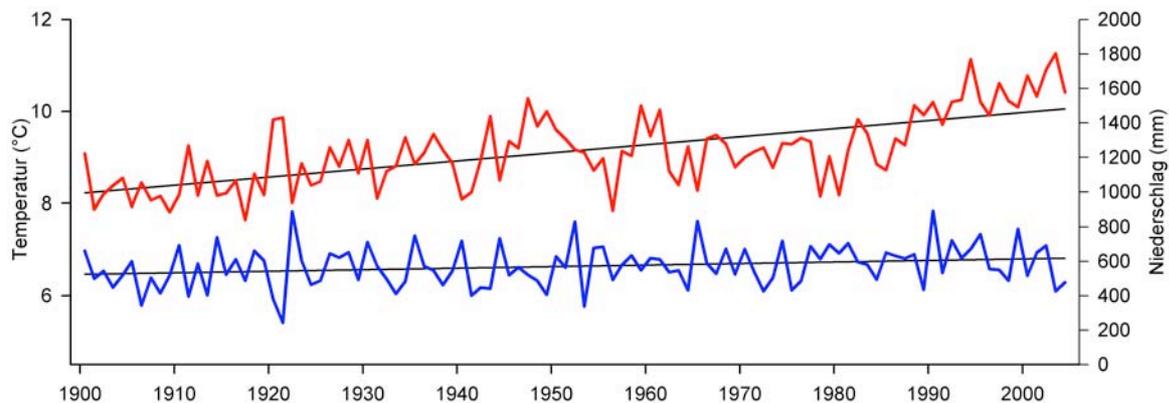


Abbildung 1. Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme sowie deren Trend in Sion seit 1900. Die Temperatur hat sich während dieser Periode signifikant erhöht, der Niederschlag unterlag grossen Schwankungen und hat im Mittel nur leicht zugenommen.

Erde zurückgehalten wird. Dies hat global gesehen zu einer Veränderung des Klimas geführt, die sich jedoch nicht überall gleich ausgewirkt hat. Je nach vorherrschenden Wetterlagen und komplexen Wechselwirkungen mit der lokalen Topographie haben sich Temperaturen und Niederschläge an verschiedenen Orten der Erde unterschiedlich verändert.

Globaler Temperaturanstieg – lokale Unterschiede

Um globale Trends zu erkennen, greifen Klimatologen auf möglichst lange Datenreihen von Messstationen aus allen Ländern zurück. Deren Analysen zeigen, dass die globale Jahresmitteltemperatur während des 20. Jahrhunderts um etwa 0.6°C angestiegen ist. Für die Schweiz liegt dieser Wert landesweit gemittelt bei 1.4°C. Das heisst, er ist mehr als doppelt so hoch, als im weltweiten Schnitt. Der grösste Anteil an dieser Erwärmung hatten in der Schweiz die Winterhalbjahre (Oktober-März) mit 1.5°C, im Sommer wurde es durchschnittlich um 1.1°C wärmer. Die in Sion gemessene Werte zeigen

Niederschläge nehmen zu

Beim Niederschlag bietet sich ein stark von den Jahreszeiten abhängiges Bild. Meteorologische Beobachtungen zeigen, dass die mittleren Winterniederschläge im 20. Jahrhundert im nördlichen und westlichen Alpenraum um 20-30% zugenommen haben. Im mediterranen Bereich der Alpen jedoch hat der mittlere Herbstniederschlag um ähnliche Beträge abgenommen. Schweizweit nehmen die Niederschläge im Winter zu, im Sommer jedoch leicht ab. Das Wallis folgt bei den Jahresniederschlägen dem alpinen Mittel mit einer leichten Zunahme über die letzten 100 Jahre (Abbildung 1).

Später Frost stoppt Flaumeiche

Pflanzen im allgemeinen und Bäume im speziellen reagieren wenig auf Veränderungen der jährlichen Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag. Für ihre Entwicklung ist vielmehr die saisonale Verteilung dieser Einflüsse und das Auftreten von Extremereignissen entscheidend. Höhere Temperaturen im Sommer stellen

im Wallis für die meisten Baumarten eine Belastung dar, von wärmeren Wintern hingegen können Nadelbäume profitieren. Andererseits können Spätfröste im Frühling den Vorteil von durchschnittlich höheren Temperaturen

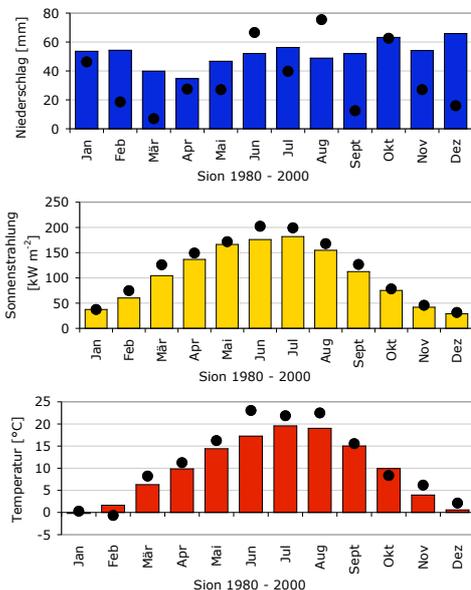


Abbildung 2. Saisonaler Verlauf von Niederschlag, Sonneneinstrahlung und Temperatur in Sion (Mittelwerte der Jahre 1980-2000). Die schwarzen Punkte markieren die Messwerte aus dem Hitzejahr 2003.

im Winter wieder zunichte machen, da bereits ausgetriebenen Knospen abfrieren. Dabei wird angenommen, dass bereits wenige Spätfröste innerhalb von zehn Jahren dazu ausreichen, um die Ausbreitung der Flaumeiche in höhere Lagen zu stoppen oder gar rückgängig zu machen.

Um verlässliche Aussagen über die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Pflanzen zu machen, wäre es deshalb wichtig zu wissen, ob mit einem durchschnittlichen Temperaturanstieg auch das Risiko von Spätfrösten sinkt.

Mehr Niederschlag im Winter bringt den Bäumen im trockenen Wallis nur bedingt Vorteile. Zusätzlicher Re-

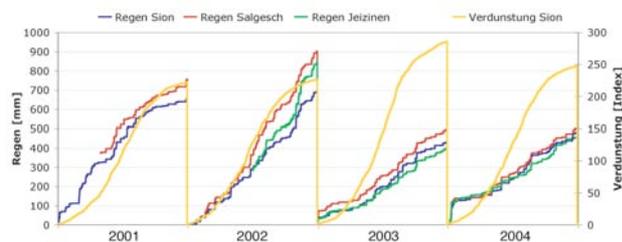


Abbildung 3. Aufsummierte Niederschlagskurven für verschiedene Messstationen im Wallis, sowie die (berechnete) Verdunstung für Sion.

gen im Frühling von April bis Juni jedoch zeigen einen grossen Effekt auf das Baumwachstum und wirken sich über mehrere Jahre gesehen entscheidend auf die Vegetationsentwicklung aus.

Das jahreszeitliche Muster von Niederschlag, Sonneneinstrahlung und Temperatur in Sion (Mittelwerte aus 20 Jahren) zeigt, dass gerade der anderswo regenreiche Frühling im Wallis durchschnittlich trockener ausfällt als das übrige Jahr (Abbildung 2). Nähme die Regenmenge im April als Folge der globalen Klimaänderung auch nur wenig zu, könnte dies deshalb in den Walliser Wäldern eine enorm positive Wirkung zeigen.

Der Verlauf der Temperatur ist eng mit der Menge eingestrahelter Sonnenenergie verknüpft (Abbildung 2), auch hier sind die saisonalen Unterschiede riesig, und Veränderungen wirken sich in jeder Jahreszeit anders auf die Pflanzen aus.

2003: Wenig Regen und Rekordhitze

Das Jahr 2003 zeichnete sich dadurch aus, dass rekordhohe Werte bei Temperatur und Sonneneinstrahlung von sehr geringen Regenmengen begleitet wurden - vor allem in den Frühlingsmonaten (Abbildung 2). Die Kombination von wenig Regen und sehr hoher Verdunstung führte zu ausgesprochen trockenen Bedingungen (Abbildung 3). Die überdurchschnittlichen Niederschläge im August kamen für die Waldbäume zu spät und hatten kaum mehr einen Einfluss auf ihre Aktivität. Im Vergleich zu den beiden feuchten Jahren 2001 und 2002 ergaben sich 2003 viel grössere Wasserdefizite im Boden und bei den Pflanzen. Das Jahr 2004 war zwar nicht regenreicher als das Vorjahr, da die Sonneneinstrahlung kleiner war, wurde aber weit weniger Wasser verdunstet. Während 2003 die untersuchten Baumarten Waldföhre, Flaumeiche, Fichte und Wachholder alle die Gaswechselaktivitäten einstellten und die Eichen gar im Juli schon ihre Blätter verloren, waren die Bäumen im Jahr 2004 trotz vergleichbar wenig Regen ständig produktiv (Abbildung 4).

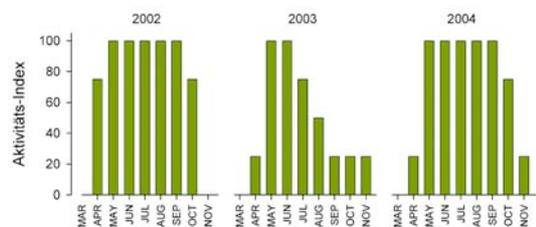


Abbildung 4. Aktivität von 186 Eichen während 3 Jahren. Ein Index von 100 bedeutet dass die Kronen vollständig grün waren, ein Wert von 0, dass keine grünen Blätter vorhanden waren.

Beim Waldbrand von Leuk flogen verkohlte Teilchen kilometerweit

Der Brandkatastrophe von Leuk im Jahr 2003 verdankt die Forschung ein unerwartetes Resultat. Weil zur Zeit des Brandes in Salgesch und Jeizinen im Rahmen eines Forschungsprojekts Laubfallen aufgestellt waren, konnte nachgewiesen werden, dass verkohlte Pflanzenteile viel weiter fliegen, als bis anhin angenommen. Diese Erkenntnis ist für die Rekonstruktion der so genannten Feuergeschichte eines Ortes von Bedeutung.

Willy Tinner, Simone Hofstetter, Fabienne Zeugin, Marco Conedera, Thomas Wohlgemuth, Lukas Zimmermann und Roman Zweifel

Am Abend des 13. August 2003 brach oberhalb von Leuk (VS) ein Feuer aus. Wegen der trocken-heissen Witterung waren tote Blätter und Äste aber auch lebende Bäume leicht entflammbar, so dass sich oberhalb des Brandherds ein Kronenfeuer rasch hangaufwärts ausbreitete. Die Flammen richteten verheerende Schäd-



Abbildung 1. Blick auf die Waldbrandfläche von Leuk. Die verbrannte Vegetation ist in der Mitte des Bildes deutlich erkennbar. Am unteren und rechten Rande der verbrannten Fläche starben Bäume in Folge der Hitzeeinwirkung zwar ab, verbrannten aber nicht.

den an: Es verbrannten 300 Hektaren Eichen-, Föhren-Fichten- und Lärchenwäldern sowie 10 Hektaren Weide- und Brachland (Abbildung 1). Die letzten Brandherde konnten erst am 5. September, mehr als drei Wochen nach dem Beginn des Waldbrands, vollständig gelöscht werden.

Messung des Teilchenniederschlags

Da im Rahmen des Projekts *Tree response to climate change* je etwa fünf Kilometer westlich und östlich des Feuers Laubfallen aufgestellt waren, erwies sich der Brand von Leuk für die Forschung als ausserordentlicher Glücksfall.

Wir konnten beobachten, dass es in den Fallen von Salgesch zu keinerlei Ablagerungen von verkohlten Teilchen kam, in Jeizinen hingegen wurden insgesamt 2487 verkohlte Pflanzenteile gefunden. Bei den meisten handelte es sich um verkohlte Fichtennadeln (Abbildung 2), aber unter den Fundstücken fanden sich auch verkohlte Holzteilchen. Das grösste Stück hatte einen

Durchmesser von 1.3 cm.

Die Ablagerungen verkohlter Teilchen in den Laubfallen setzten sofort nach dem Ausbruch des Feuers ein, und dieser Niederschlag blieb während der ganzen Dauer des Brandes gross. Aber auch in den folgenden Monaten wurden weitere verkohlte Stücke gefunden, wenn auch in viel geringerer Zahl (Abbildung 3). Das letzte Teilchen wurde im Oktober 2003 registriert.

Grosse Flugdistanzen und zahlreiche Kohleteilchen

Die Tatsache, dass Kohleteilchen bei Waldbränden vom Wind weit verfrachtet werden können, war Spezialisten bereits vor dem Leuker Brand bekannt. Aus den USA und Australien waren Transporte von verkohlten Pflanzenresten über mehr als 20 Kilometer eindeutig belegt, bloss fehlte bis anhin eine Quantifizierung dieser Ereignisse. Experimentell gelegte Waldbrände zeigten, dass der Holzkohleeintrag bereits in einer Entfernung von 60 Metern stark abnahm. Also ging man davon aus, dass nur ein Bruchteil der bei einem Brand verkohlten Pflanzenteilchen über grössere Distanzen transportiert wird. Die Teilchen in den Laubfallen von Jeizinen jedoch zeigten ein völlig anderes Bild. Der Holzkohleeintrag erwies sich dort in mehr als fünf Kilometer Distanz als gleich hoch oder höher als in unmittelbarer Nähe grosser experimenteller Feuer.

Dieses Resultat stellt einen Interpretationsgrundsatz der Feuergeschichte in Frage. Verkohlte Pflanzenteile, die in Seen oder Mooren über Tausende von Jahren abge-



Abbildung 2. Verkohlte Fichtennadeln aus den Laubnetzen von Jeizinen.

lagert wurden, ermöglichen es, den geschichtlichen Ablauf von Bränden in einem Gebiet zu rekonstruieren. Dabei wird die Häufigkeit verkohlter, makroskopisch grosser Teilchen und deren Alter bestimmt. Die Abfolge von Holzkohleansammlungen in den Ablagerungen in Seen und Mooren gibt Auskunft über die Häufigkeit der Feuer an einem bestimmten Standort. Bis anhin wurde

bei der Analyse dieser Sedimente gängigerweise angenommen, dass verkohlte Pflanzenteile von mehr als einem viertel Millimeter Grösse während eines Brandes nicht weit fliegen und man sie deshalb in der Nähe des historischen Brandherdes wieder findet. Diese Annahme, so können wir nun zum ersten Mal quantitativ aufzeigen, stimmt nicht. Die Fundstätten der Kohleteilchen müssen nicht mit der Umgebung des Brandorts identisch sein.

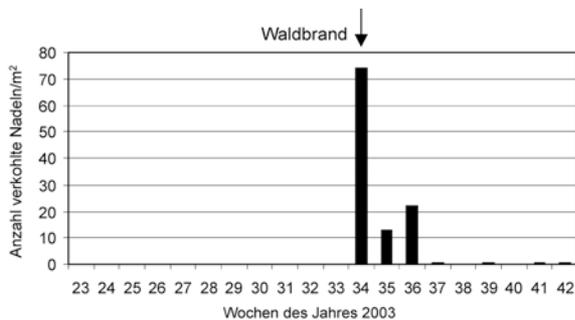


Abbildung 3 Zeitliches Auftreten von verkohlten Fichtennadeln in den Laubnetzen von Jeizinen, 5.3 km östlich des Brandes oberhalb von Leuk, VS. Der Pfeil zeigt den Zeitpunkt des Feuers an (Woche 34).

Feuergeschichte nützt Naturmanagement

Die genaue Kenntnis der Feuergeschichte eines Gebiets ist nicht bloss von historischem Interesse. Eine Einschätzung der natürlichen Brandhäufigkeiten ist zum Beispiel für eine naturnahe Bewirtschaftung (Naturmanagement) entscheidend. Informationen zur Brandhäufigkeit sind aber auch für Waldbaumassnahmen in Schutzwäldern und für den Arten- und Biotopschutz von

grosser Bedeutung, da bestimmte Aspekte des Feuerregimes wie zum Beispiel die Häufigkeit von Bränden für das Überleben von Ökosysteme entscheidend sein können. Es gibt Vegetationstypen wie Heidelandschaften in West- und Nordeuropa, die auf regelmässige Brände angewiesen sind. Umgekehrt reagieren zum Beispiel Edelholzarten in mitteleuropäischen Laubmischwäldern sehr empfindlich auf wiederholte Brände.

Konsequenzen für Rekonstruktionen

Die durch die Laubfallen in Jeizinen gemachte Entdeckung, dass Waldbrände ihre Spuren in viel grösserer Distanz hinterlassen, als bisher angenommen, stellt die bisherigen feuergeschichtlichen Rekonstruktionen nicht grundsätzlich in Frage. Vergleichende Studien haben nämlich gezeigt, dass die Rekonstruktion von Bränden aus See- und Moorablagerungen gut mit historischen Aufzeichnungen zu Waldbränden übereinstimmen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Feuergeschichte in einem Radius von rund 200 Metern um den Untersuchungsstandort tatsächlich mittels Holzkohleanalyse rekonstruiert werden kann.

Auch wenn verkohlte Pflanzenteile über grosse Distanzen verfrachtet werden, bleibt während Waldbränden offensichtlich die überwiegende Menge der Kohleresten an Ort und Stelle. Unsere Erkenntnisse werfen allerdings neues Licht auf die Häufigkeit von Bränden. Bis anhin wurden in feuergeschichtlichen Arbeiten teilweise sehr geringe Konzentrationen von Kohleteilchen als Brand in unmittelbarer Umgebung der Fundstelle gedeutet. Unsere Resultate belegen nun allerdings, dass solche Werte durchaus auch von viel weiter entfernten Waldbränden herrühren können.



Abbildung 4. Die beiden Fallentypen mit denen die verkohlten Nadeln in Salgesch und Jeizinen aufgefangen wurden.

Jahringwachstum hängt stärker vom Regen als von der Temperatur ab

An trockenen Standorten wie Salgesch und Jeizinen ist der ausreichende Regen von April bis Juni die stärkste treibende Kraft für das Wachstum der Bäume. Dies zeigt sich besonders deutlich bei Flaumeiche, Waldföhre und Fichte. Die Temperatur beeinflusst das Wachstum kaum kurzfristig, sondern hauptsächlich indirekt über Zeiträume von Jahren oder Jahrzehnten.

Roman Zweifel, Lukas Zimmermann, Fabienne Zeugin und Andreas Rigling

Das Baumwachstum ist ein komplexer Vorgang, bei dem verschiedene Mechanismen zusammenspielen. Erst durch das zeitgleiche Messen verschiedener Einflussfaktoren wird es möglich, das Gewicht der einzelnen Einflussgrößen zu ermitteln. Die Resultate der vierjährigen Messkampagne in Salgesch und Jeizinen liefern in dieser Hinsicht eindeutige Erkenntnisse: So geht man für viele Standorte davon aus, dass sich wärmere Durchschnittstemperaturen positiv auf das

Monaten jedoch wuchsen die Stämme kaum. Zwischen den Wachstumsmustern der Eiche und jenen der beiden Nadelbaumarten zeigten sich deutliche Unterschiede. Während die Eiche schon vor dem Austreiben der Blätter einen guten Teil ihres Jahrrings anlegte, setzte das Jahringwachstum bei Föhre und Fichte erst ein bis zwei Wochen nach der Eiche ein (Abbildung 2). Also lange nachdem diese Baumarten ihre, bereits im März einsetzende, maximale Verdunstungs- und Photosyntheseaktivität erreicht hatten. Die geringe Bedeutung der Temperatur für die wöchentlichen Zuwächse ist an Trockenstandorten bestimmt besonders ausgeprägt. Der Mechanismus jedoch, der dieser Beobachtung zu Grunde liegt, dürfte von allgemeiner Bedeutung sein und relativiert den direkten Zusammenhang zwischen Temperatur und Jahringbreite.

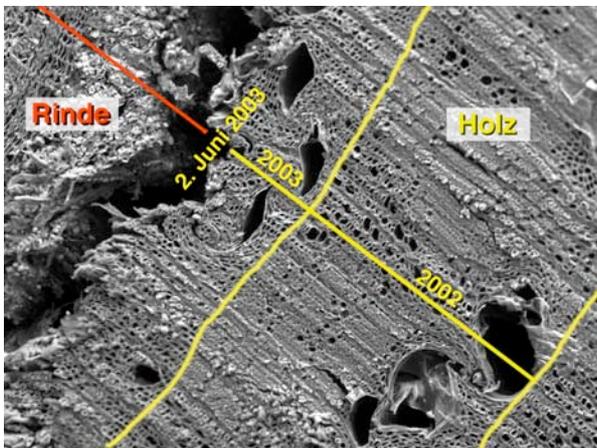


Abbildung 1. Querschnitt durch eine Stammprobe einer Eiche (*Quercus pubescens*, Salgesch). Die Probe wurde am 2. Juni 2003 entnommen, d.h. das Wachstum des Jahrrings 2003 ist bis zu diesem Datum sichtbar. Der Riss zwischen Holz und Rinde entstand durch die Präparation. Die grossen „Löcher“ im Holz hingegen sind Teil der Holzstruktur und zeigen die grosslumigen Frühholzgefässe, die vor dem Austreiben der Blätter angelegt werden. Diese Gefässe sind nötig, um die Baumkrone beim Blattaustrieb mit ausreichend Wasser versorgen zu können.

Wachstum auswirken. Für die untersuchten Baumarten in Talbodennähe des Wallis jedoch ist diese Aussage falsch. Höhere Temperaturen, die gewöhnlich mit trockenen Bedingungen einhergehen, bewirken kleinere Wachstumsraten. Sehr wichtig sind hingegen Menge und Zeitpunkt des Niederschlags.

Die Analyse des Dickenwachstums der untersuchten Bäume zeigte, dass das Jahringwachstum - wenn man es von Woche zu Woche misst (Abbildung 1) - weit weniger von der Temperatur abhängt als von der Wasserversorgung. Die entscheidende Bedingung für das Wachstum ist ausreichender Regen in den Monaten April bis Juni. Über 90% eines Jahrringes, so zeigte sich, wuchsen in diesen drei Monaten heran. Juli bis September trugen die restlichen 10% bei, in den übrigen

Puncher und Dendrometer

Was Jahrringe sind, weiss in der Schweiz jedes Kind. Verholzende Pflanzen (Bäume und Sträucher) bilden in unserer Klimazone gut sichtbare Ringe (Abbildung 1). Dies vor allem deswegen, weil die ausgeprägte Saisonalität unseres Klimas den Bäumen nur im Sommer eine optimale physiologische Aktivität erlaubt. Im Winter hingegen sind Temperaturen unter dem Gefrierpunkt für sich entwickelnde Zellen gefährlich. Das saisonale Wachstum lässt sich durch neue Beobachtungsmethoden auch an lebenden Bäumen zeigen. Mit einem kleinen, Puncher genannten, Holzbohrer können Holzproben in regelmässigen zeitlichen Abständen entnommen werden (Abbildung 1), oder das Wachstum lässt sich mit einem so genannten Dendrometer kontinuierlich aufzeichnen (Abbildung 3).

Regen treibt das Jahringwachstum an

Mit Hilfe dieser Methoden konnten wir zeigen, dass das Wachstum der Bäume an den Untersuchungsstandorten kaum von der Temperatur, aber sehr stark vom Regen abhängt. Aus dieser Beobachtung und weiteren Erkenntnissen folgern wir, dass ein physiologischer Mechanismus für das Dickenwachstum sehr eng mit dem Wasserhaushalt der Bäume gekoppelt sein muss. Dabei spielt der ausreichende Regen an einem trockenen Standort zweifellos eine grössere Rolle, als an einem feuchten Standort. Umgekehrt fallen Faktoren wie Temperatur, Licht und Luftfeuchtigkeit stärker ins Gewicht, wo ständig viel Bodenwasser vorhanden ist. Die Abhängigkeit des Wachstums vom Wasserhaushalt gilt jedoch nicht nur für Bäume im trockenen Wallis, sondern ist

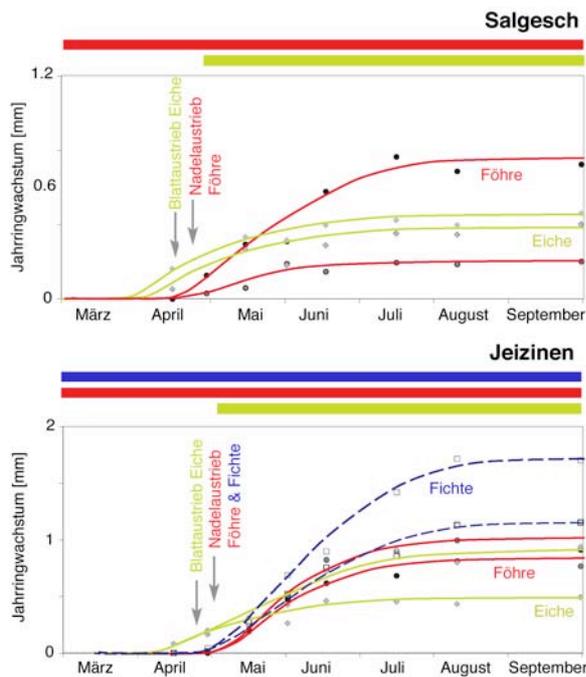


Abbildung 2. Wachstumskurven von **Flaumeiche**, **Waldföhre** und **Fichte** an den Standorten Salgesch und Jeizinen im Jahr 2003. Die farbigen Balken bezeichnen die Zeit der ökophysiologischen Aktivität (Transpiration und Photosynthese) der jeweiligen Baumart. Während die Eiche zuerst mit dem Jahringwachstum beginnt und erst dann ihre Blätter austreibt und ökophysiologisch aktiv wird, sind die Nadelbäume schon vor dem Einsetzen des Jahringwachstums voll aktiv. Jahringwachstum und Nadelaustrieb beginnen ca. 2 Wochen nach der Eiche. Am höher gelegenen Standort bei Jeizinen beginnt die Vegetationszeit 1-2 Wochen später als in Salgesch.

allgemein gültig. Grund: Die Zellen teilen sich in der Kambium genannten Zellschicht zwischen Holz und Rinde, und damit sie sich strecken können, ist ein gewisser Wasserdruck, im Fachbegriff Turgor, nötig. Dieser Turgor steht in umgekehrter Abhängigkeit zur Transpiration des Baums und der Trockenheit des Bodens – das heisst, er erreicht den nötigen Schwellenwert für Wachstum in der Regel erst, wenn die Transpiration aufhört und der Boden genügend Wasser enthält. Mit anderen Worten, wenn es regnet oder bei ausreichender Bodenfeuchte in der Nacht.

Die Breite eines Jahrrings hängt aber nicht nur von den klimatischen Bedingungen während den knapp drei Wachstumsmonaten ab. Da die Holzzellen zumindest teilweise aus den Kohlestoffreserven des Baumes gebildet werden, spielen beim Wachstum der Ringe auch die Bedingungen des vergangenen Jahres eine Rolle. Dies gilt speziell auch für die Knospen, die bereits im Vorjahr angelegt werden und deshalb stark von der vergangenen Sommerproduktivität des Baumes abhängen. Diese Produktivität wiederum wird bestimmt von der Wasserverfügbarkeit, dem Licht, der Temperatur

und anderen klimatischen Faktoren. Sie führt an eher feuchten und kühlen Standorten (z.B. obere Waldgrenze) zum bekannten Zusammenhang zwischen Temperatur und Jahring, wenn genügend lange Zeiträume (Jahre bis Jahrhunderte) betrachtet werden.

Jahringwachstum im Vergleich

Im Gegensatz zur oberen Waldgrenze, wo der Sommer 2003 mit seinen Rekordtemperaturen zu überdurchschnittlichem Baumwachstum führte, wiesen alle drei beobachteten Baumarten auf unseren trockenen Untersuchungsstandorten einen sehr schmalen Jahring auf – den schmalsten der untersuchten sieben Jahre. Es zeigte sich klar, dass die Eiche wie auch die Nadelbaumarten unter den heissen und sehr trockenen Bedingungen zu leiden hatten. Viele Baumindividuen verloren ihre Blätter aussergewöhnlich früh oder stellten ihre ökophysiologische Aktivität bereits im Juli ein (siehe auch „Klimaänderung“, Seite 6-7). Das geringe Wachstum im Jahr 2003 lässt sich also zu einem grossen Teil durch die trockenen Bedingungen in den Monaten April bis Juni erklären. Diese Erklärung für die minimale Jahringbreite ist umso einleuchtender, da das vorangehende Jahr 2002 die höchsten gemessenen Wachstums- und Aktivitätsraten zeigte und damit eigentlich optimale Vorbedingungen – z.B. in Form von gut gefüllten Kohlestoffreserven – für das Jahr 2003 schuf.

Ganz anders präsentierte sich die Situation 2004. Trotz besserer Wachstumsbedingungen im Sommer resultierte auch in diesem Jahr nur ein relativ schmaler Ring. Wahrscheinlicher Grund: Die schlechten, vom Hitzejahr 2003 geschaffenen, Vorbedingungen und wiederum geringer Niederschlag in den drei wichtigsten Wachstumsmonaten.

Auf Grund dieser Erkenntnisse vermuten wir, dass weniger die höheren Temperaturen Auswirkungen auf die Walliser Wälder haben werden, als vielmehr veränderte Niederschlagsverteilungen.



Abbildung 3. Dendrometer sind elektronische Messgeräte, die kontinuierlich den Stammradius messen. Daraus lassen sich der Rindenwassergehalt und das Jahringwachstum eines Baumes ableiten.

Noch keine bleibenden Klimaschäden am Photosyntheseapparat der Flaumeiche

Steigende Temperaturen und weniger Regen haben Folgen für Wachstum und Überleben der Bäume. Eine wichtige Rolle spielt dabei, dass vermehrt Hitze und Dürre als Folge der Klimaveränderung die Photosyntheseaktivität beeinträchtigen. Im Wallis untersuchte Flaumeichen zeigten während des Hitzesommers 2003 eine stark reduzierte Photosyntheseaktivität. Bleibenden Schaden nahm der Photosyntheseapparat allerdings nicht.

Pierre Haldimann, Alexander Gallé und Urs Feller

Der Klimawandel wird den Bäumen in der Schweiz künftig vermehrt zu schaffen machen, denn die fortlaufende globale Erwärmung dürfte dazu führen, dass die Vegetation häufiger extremen Sommerstressbedingungen ausgesetzt ist. Eine Auswirkung des zunehmenden Stresses könnte die Schädigung des Photosyntheseapparates in den Blättern der Bäume sein. Dieses pflanzliche Energiekraftwerk ist für alle Baumarten überlebenswichtig. Laubbäume, die nur saisonal Blätter tragen, wie zum Beispiel die Walliser Flaumeiche, sind darauf angewiesen, dass in dieser Zeit die klimatischen Bedingungen stimmen, um Kohlendioxid (CO₂) aus der Luft aufzunehmen und es mit Hilfe der Photosynthese in Zucker umzuwandeln. Doch dies ist nicht immer möglich. Im Sommer kommt es regelmässig vor, dass Wassermangel und erhöhte Temperaturen die CO₂-Aufnahme beeinträchtigen. Verschärft sich dieses Problem künftig als Folge der Klimaänderung, könnte es

sich mittelfristig für die Bäume sehr nachteilig oder gar tödlich auswirken. Grund: Mit einem geschädigten Photosyntheseapparat können die Blätter die eingeschränkte CO₂-Umwandlung nur sehr beschränkt kompensieren, wenn sich die klimatischen Bedingungen nach einer Hitze- und Trockenperiode wieder verbessern.

Messungen an gestressten Flaumeichen im Wallis

Um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Laubbäume unter realen Bedingungen zu studieren, haben wir die Reaktion des Photosyntheseapparats der Flaumeiche auf extreme Dürre- und Hitzestressbedingungen untersucht. Wir haben dazu einen Versuchsstandort gewählt, der das künftige Schweizer Klima gewissermassen vorwegnimmt: Das Gebiet um Salgesch im Wallis, das zu den trockensten und wärmsten Regionen des Landes zählt.

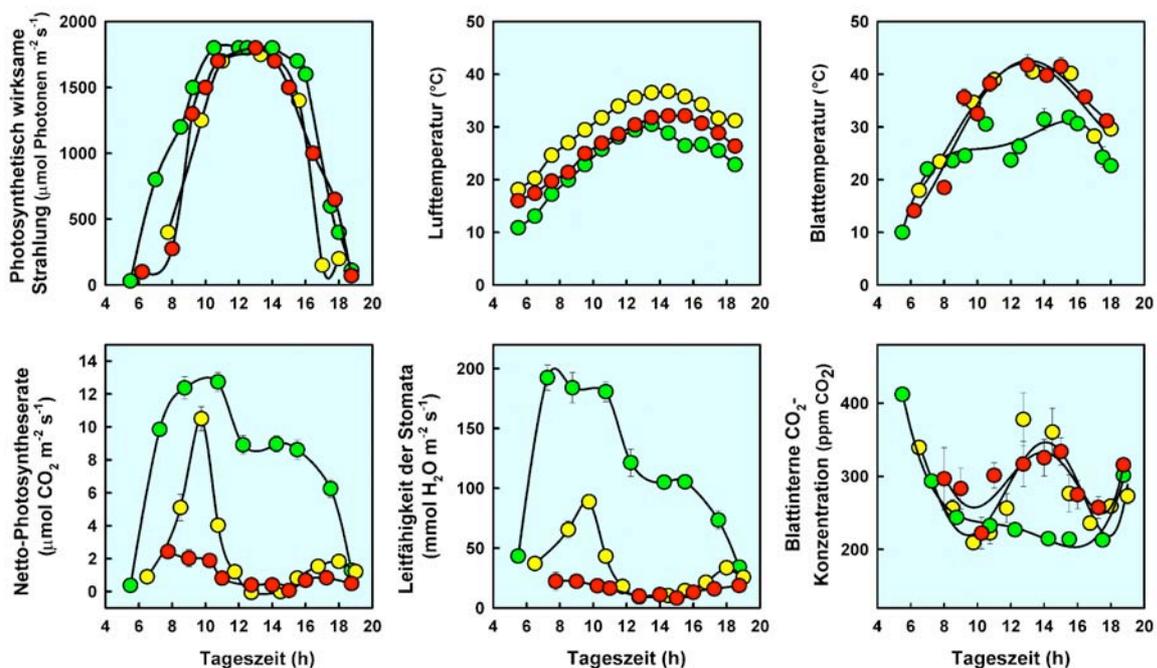


Abbildung 1 Licht- und Temperaturverhältnisse sowie physiologische Eigenschaften von Flaumeichenblättern bei Trockenheit und erhöhter Temperatur. Das Blatt-Wasserpotential vor Sonnenaufgang lag am 18. Mai 2004 bei -0.34 MPa (gute Wasserversorgung; grüne Symbole), am 06. August 2003 bei -2.07 MPa (moderates Wasserdefizit; gelbe Symbole) und am 23. Juli 2003 bei -2.70 MPa (ausgeprägtes Wasserdefizit; rote Symbole).

Konkret haben wir 2003 und 2004 den Tagesverlauf von Licht- und Temperaturverhältnissen sowie jenen der so genannten Photosynthese-Rate gemessen. Ebenfalls bestimmt wurde der Öffnungszustand (Leitfähigkeit) der Stomata genannten Spaltöffnungen im Blatt, sowie die CO₂-Konzentrationen in den Flaumeichenblättern (Abbildung 1). Zu Vergleichszwecken führten wir die Messungen an drei Tagen mit unterschiedlich starkem Trockenstress durch. Bei guter Wasserversorgung stieg die Photosynthese-Rate am Morgen mit steigender Lichteinstrahlung an und erreichte am späten Vormittag ein Maximum. Danach nahm die Rate rasch um ca. 30% ab und blieb dann konstant, bis die Photosynthese abends durch die sinkende Lichteinstrahlung weiter begrenzt wurde. Unter Bedingungen mit moderatem Trockenstress erreichte die maximale Photosynthese-Rate nur noch am Vormittag einen hohen Wert. Bei extremer Trockenheit war sie während des ganzen Tages sehr niedrig.

Unterschiedliche Blatt- und Lufttemperaturen

Die Veränderungen in der Photosynthese-Rate korrelierten mit entsprechenden Veränderungen des Öffnungszustandes der Stomata. Die durch Wasserdefizit verursachte Verminderung der Photosynthese stand aber auch mit Störungen im Stoffwechsel der Bäume in Verbindung. Wäre dies nicht der Fall, hätte der reduzierte stomatare Öffnungszustand zu einer starken Abnahme der blattinternen CO₂-Konzentration führen müssen, dies aber trat nicht ein.

Als aufschlussreich erwiesen sich auch die Messungen von Blatt- und Lufttemperatur. Litten die Bäume nicht unter Wasserstress, lagen beide Temperaturwerte etwa gleich hoch. Bei einem erhöhten Wasserdefizit aber stieg die Temperatur im Blatt um die Mittageszeit deutlich höher an, als jene in der Luft und erreichte Werte von über 40°C. Dieser beachtliche Unterschied lässt sich dadurch erklären, dass die Blätter als Folge der geringeren Öffnung der Stomata nur wenig über die Abgabe von Wasserdampf gekühlt werden konnten. Bei starker Lichteinstrahlung führte dies zu einem deutlichen Anstieg der Blattoberfläche. Die hohen Blattoberflächen aber hatten einen Anstieg der internen CO₂-Konzentration zur Folge, da der durch die hohe Lufttemperatur und starke Sonneneinstrahlung über Mittag hervorgerufene Hitzestress die Umwandlung von CO₂

zu Zucker zusätzlich verunmöglichte.

Noch keine bleibende Schäden durch Trockenstress

Erstaunlicherweise führte die Kombination dieser Belastungen bei den Flaumeichen nicht zu bleibenden Schäden am Photosyntheseapparat. Ergänzende Untersuchungen zu den beschriebenen Messungen zeigten nämlich, dass die potentielle Leistungsfähigkeit des Photosyntheseapparates selbst bei ausgeprägter Trockenheit oder Hitze weitgehend erhalten blieb. Mit anderen Worten: Waren die klimatischen Extremphasen vorbei, funktionierte die Photosynthese wieder weitgehend normal. Dies zeigt, dass Flaumeichen in der Lage sind, auch widrige Sommerstressbedingungen relativ gut zu überstehen. Im Sommer des Hitzejahres 2003 allerdings waren die Stressbedingungen in Salgesch derart extrem, dass das Leben der Bäume völlig durcheinander geriet: Viele Flaumeichen warfen ihr Laub bereits ab Mitte Juli ab. Im Frühling 2004 kam es dann



Abbildung 2 Der Hitzesommer 2003 machte nicht nur den Bäumen zu schaffen: Alexander Gallé sucht Schutz vor der Sonne im Flaumeichenhang oberhalb von Salgesch.

aber wieder zu einem normalen Blattaustrieb. Daraus lässt sich nun aber nicht schließen, dass die Klimaerwärmung den Flaumeichen nichts anhaben kann. Noch bleibt abzuklären, wie gut die Flaumeichen extreme Sommerstressbedingungen überleben, wenn sie über mehrere, aufeinanderfolgende Jahre auftreten. Genau diese Entwicklung nämlich ist im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung zu erwarten.

Flaumeiche, Föhre und Wachholder reagieren unterschiedlich auf Trockenstress

Trockenheit verursacht Wassermangel und kann schliesslich zu Schäden in Bäumen führen. Um solche Schäden zu verhindern, verfolgt jede Baumart ihre eigene Wassersparstrategie. Wie sogenannte Stomata-Regulations-Untersuchungen an drei Baumarten in Salgesch und Jeizinen zeigten, reagiert die Waldföhre im Vergleich mit Flaumeiche und Wachholder eindeutig am empfindlichsten auf Hitze und Trockenheit.

Roman Zweifel

Wie reagieren Bäume, wenn sich das Klima ändert? Dieser Frage gingen wir mit Messungen an zwei besonders trockenen Standorten im Oberwallis nach. Bäume sind, wie Pflanzen ganz allgemein, bei sich ändernden klimatischen Bedingungen auf ihre Anpassungsfähigkeit angewiesen. Die Anpassungsfähigkeit vieler Pflanzenarten in ihrem Lebensraum ist zwar erstaunlich gross,



Abbildung 1. Blick auf die Untersuchungsfläche oberhalb von Salgesch. Die sehr karge Vegetation ist geprägt durch Flaumeiche, Waldföhre und Wachholder. Der horizontale Streifen mit dichter Vegetation verläuft entlang einer Suone (Bewässerungskanal).

aber nicht unbegrenzt. Es stellt sich deshalb die Frage, ob einzelne Arten unter den heute herrschenden Bedingungen bereits am Rande ihrer physiologischen Möglichkeiten sind. Für die Eichen-Föhren Vegetation des Wallis zum Beispiel (Abbildung 1) bedeuten höhere Temperaturen bei etwa gleich bleibenden Niederschlägen eine markante Erhöhung des Trockenstresses.

Anpassung nur beschränkt möglich

Mittelfristig hat ein Baum die Möglichkeit, sich beschränkt morphologisch anzupassen. Das heisst, er bildet mehr oder weniger Wurzeln, verändert die Struktur der Wasserleitgefässe oder er investiert mehr oder weniger in das eigene Wachstum oder in die Reproduktion. Kurzfristig allerdings haben Bäume hauptsächlich die Möglichkeit, ihre Spaltöffnungen, die Stomata, zu schliessen und sich so vor schädigendem Wasserverlust durch Transpiration zu schützen (Abbildung 2). Schliesst ein Baum seine Stomata, verringert er aber

nicht nur den Wasserverlust, sondern nimmt auch kein Kohlendioxid (CO_2) und damit keine Nahrung mehr auf. Dies wirkt sich unmittelbar auf seine Produktivität aus und kann mittelfristig tödliche Folgen haben.

Messungen im Zehnminutentakt

Wer den Verlauf des Öffnungsgrades der Stomata von Baumindividuen über das ganze Jahr kennt, weiss, wie viel Wasser ein Baum verbraucht und wie produktiv er ist. Zudem lässt sich anhand der Stomata-Regulationsmuster erkennen, ob eine Baumart bereits an den Grenzen ihrer Möglichkeiten operiert, oder ob sie noch Reserven besitzt und sich weiter an zunehmende Hitze und Trockenheit anpassen kann. An den Beobachtungsstandorten Salgesch und Jeizinen wurden über vier Jahre kontinuierlich im Zehnminutentakt alle nötigen klimatischen und physiologischen Grössen gemessen, um den Stomataöffnungsgrad an Bäumen zu bestimmen.

Grosse Unterschiede zwischen den Arten

Dabei machten wir unerwartete Beobachtungen: Zwar wachsen die drei in Salgesch untersuchten Baumarten Waldföhre (*Pinus sylvestris*), Flaumeiche (*Quercus pubescens*) und Wachholder (*Juniperus communis*) im gleichen Lebensraum und gelten alle als sehr trockenresistent. Die Erwartung aber, dass die drei Arten deswegen auch ihre Stomata ähnlich regulieren, bestätigte

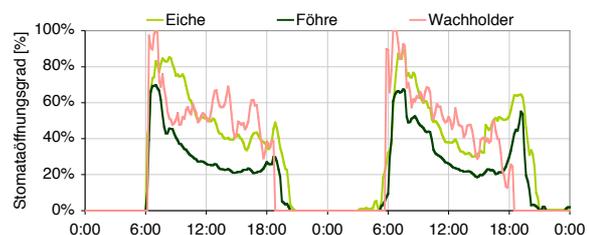


Abbildung 2. Täglicher Verlauf der Stomataöffnungsgrade (Spaltöffnungen) von Flaumeiche, Waldföhre und Wachholder am 4. und 5. Juni 2001. Am Morgen öffnen die Stomata in der Regel für kurze Zeit vollständig, danach werden sie je nach Baumart mehr oder weniger stark geschlossen und erst gegen Abend z.T. nochmals geöffnet. Offene Stomata bedeuten eine grosse Produktivität (Photosynthese) aber auch einen grossen Wasserverlust.

sich nicht. Die ermittelten Resultate sind so eindeutig wie überraschend: Jede der drei Arten reagierte mit einem klar unterscheidbaren Stomata-Regulations-

muster auf die mikroklimatischen Bedingungen.

Die Föhre erwies sich als den anderen beiden Arten überlegen, wenn die Temperaturen kühl und Boden und Luft für Walliser Verhältnisse feucht blieben (Abbildung 3). So waren die Föhren-Stomata nach Regen oder an bewölkten Tagen überdurchschnittlich weit geöffnet. Umgekehrt reagierte die Föhre mit starkem Schliessen der Stomata, sobald die Temperaturen anstiegen und der Trockenstress zunahm.

Zwei Trockenstress-Spezialisten

Die Eiche zeigte bei trockenen Bedingungen deutlich weiter geöffnete Stomata als die Föhre. An heissen Sommertagen vermochte sie Dank dieser Strategie photosynthetisch weiter aktiv zu bleiben, während die Föhre ihre Stomata wegen Wassermangels bereits schloss. Auch reagierte die Eiche kaum auf die Temperatur. Sie erwies sich damit als deutlich trocken- und hitzeresistenter als die Föhre.

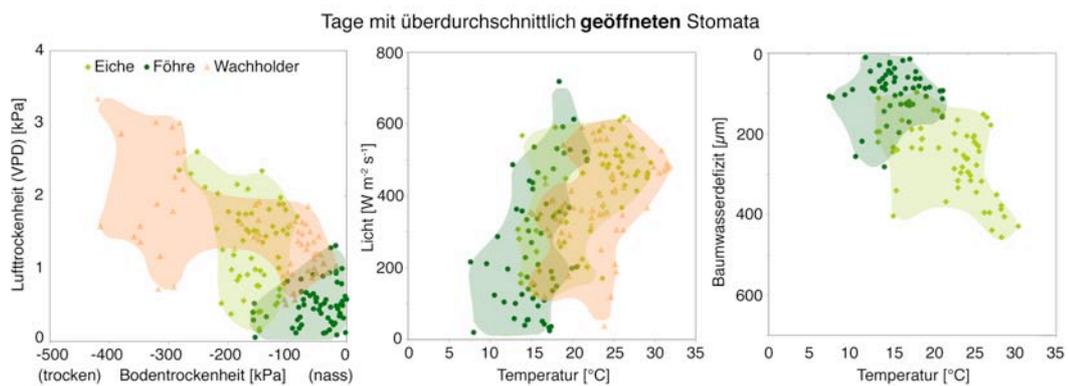
Als eigentlicher Spezialist im Umgang mit Hitze und Trockenheit stellte sich der Wachholder heraus. Beson-

ders tolerant zeigte er sich gegenüber sehr tiefer Luftfeuchtigkeit. Generell war er den beiden anderen Baumarten unter den extremsten Bedingungen bezüglich ökophysiologischer Aktivität überlegen.

Bedingungen wie im Hitzesommer 2003 jedoch überstiegen die physiologischen Möglichkeiten aller drei untersuchten Baumarten in Salgesch. Die Bäume stoppten ihre Photosynthese- und Transpirations-Aktivität praktisch vollständig. Die Flaumeichen warfen gar bereits Mitte Juli einen grossen Teil ihres Laubes ab (Abbildung 4 „Klimaänderung“, Seite 7).

Zu berücksichtigen gilt, dass sich die gezeigten Resultate nur auf den Sommer beziehen und die Winteraktivität der Nadelbäume nicht einbezogen wurde. Der Winter jedoch wird im Wallis speziell für die Föhre zunehmend wichtiger. Grund: Die Föhren profitieren von den angestiegenen Wintertemperaturen und können so Defizite aus dem Sommer unter Umständen kompensieren.

a)



b)

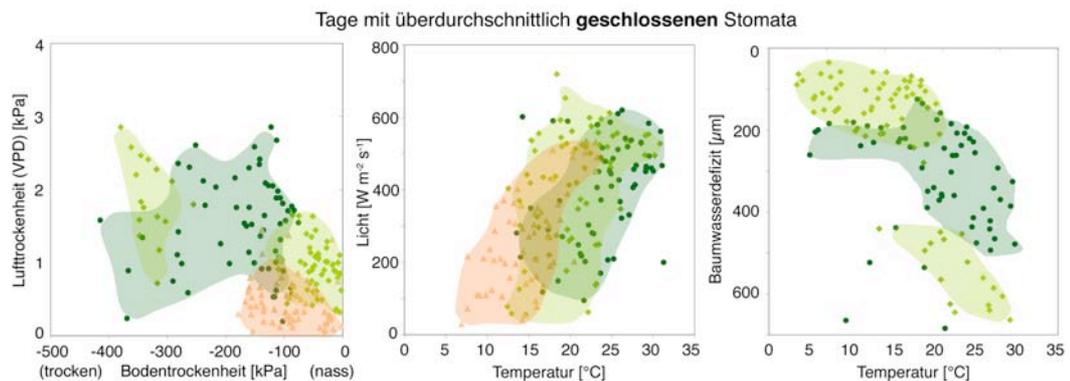


Abbildung 3. Die einzelnen Punkte repräsentieren Tage, an denen eine Baumart relativ zu den beiden anderen ihre Stomata überdurchschnittlich **a)** offen oder **b)** geschlossen hatte. Die eingefärbten Flächen (hellgrün = Flaumeiche, dunkelgrün = Waldföhre, orange = Wachholder) bezeichnen Häufungen von Punkten einer Art und repräsentieren damit die klimatischen Bedingungen, die zu über- oder unterdurchschnittlicher Aktivität einer Baumart führten. Aussagekräftig sind die Flächen einer Farbe, die in der entsprechenden Darstellung von **a)** und **b)** nicht dieselben klimatischen Bereiche abdecken.

Bei Hitze profitieren Flaumeichen von schattenspendenden Nachbarbäumen

Der Hitzesommer 2003 hatte starke Auswirkungen auf die Vegetation oberhalb von Salgesch. Messungen des Wasserflusses in den Stämmen von Flaumeichen, der Zustand ihrer Blätter und ihre Sterberaten zeigen auf, wie stark die Trockenheit die Bäume belastet hat. Besonders negativ wirkten sich Dürre und Hitze auf Bäume ohne schattenspendende Nachbarn aus. Dieses Erkenntnis hat Folgen für allfällige Aufforstungen mit Flaumeichen.

Lukas Zimmermann und David Newbery

Für den Stoffwechsel eines Baumes ist zentral, dass seine Blätter genügend mit Wasser versorgt werden. Der Baum nimmt das Wasser über die Wurzeln auf und transportiert es über Stamm und Äste zu den Blättern. Messungen dieses, Safflusses genannten, Phänomens im Stamm sind technisch relativ einfach und ergeben ein gutes Bild der Wasserversorgung eines Baumes. Hohe Safflussraten während des Tages bedeuten, dass die Blätter ausreichend mit Wasser versorgt sind. Bei wenig Saffluss hingegen ist der Stoffwechsel eingeschränkt. Die Untersuchung des Safflusses war eines der Ziele, als wir im Jahr 2001 oberhalb von Salgesch eine grosse Waldfläche zur Beobachtung der Vegetation ausstatten

insbesondere der Sommer 2003 einen markanten Einfluss auf die Vegetation an diesem Südhang hatte.

Der Saffluss der Eichen

Dank Messungen an 22 zufällig gewählten Eichen unterschiedlicher Grösse konnten wir einen starken Rückgang des Safflusses im Jahr 2003 im Vergleich mit 2002 und 2004 zeigen (Abbildung 2).

In der Zeit zwischen dem Blattaustrieb im April bis Anfang Juni unterschieden sich die mittleren Wasserflussraten in den verglichenen Jahren wenig voneinander. Schon Ende Juni 2003 aber lag der Saffluss der Eichen deutlich unter den Werten des Vorjahres, und bis Ende

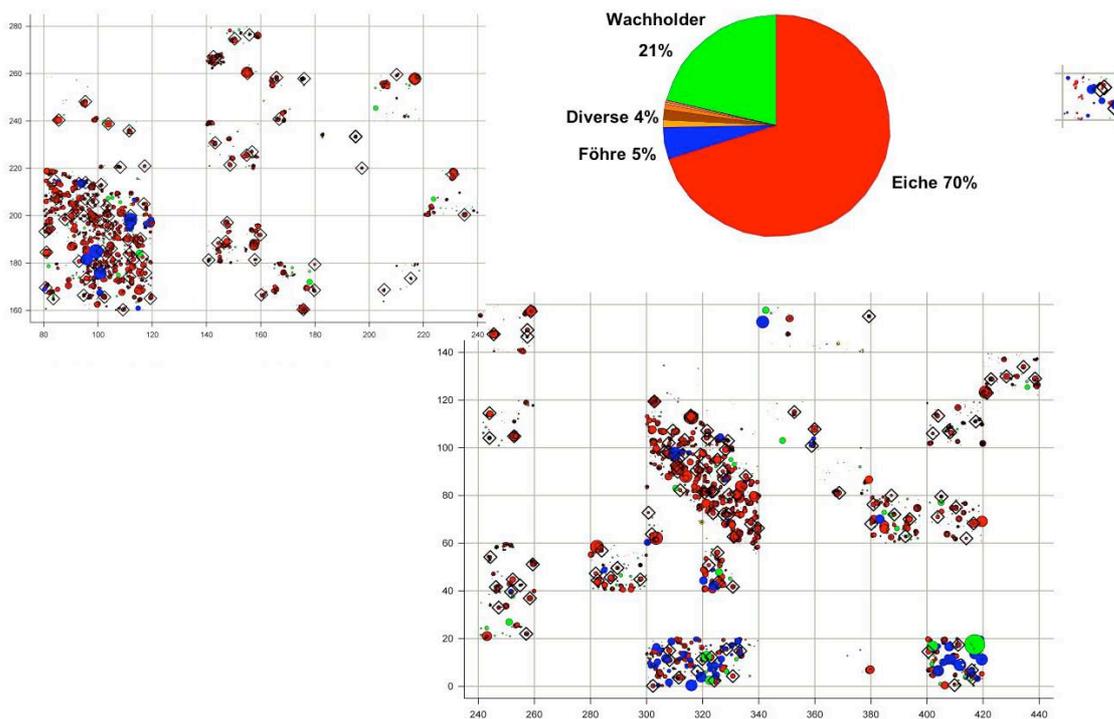


Abbildung 1. In 42 Flächen (20 x 20m) in Salgesch wurden insgesamt 5292 Bäume vermessen. Die Farben entsprechen den verschiedenen Arten gemäss dem Kuchendiagramm. Unter 186 Eichen wurden Laubfallen aufgestellt und monatlich geleert (schwarze Vierecke). Dieselben Bäume wurden auch auf ihren Blattstatus hin untersucht. An 22 Eichen wurde der Saffluss gemessen. Weisse Flächen bedeuten nicht, dass dort keine Bäume stehen, sondern dass dort keine vermessen wurden (Zufallsprinzip).

ten (Abbildung 1). Messungen in unterschiedlichem räumlichem und zeitlichem Massstab ermöglichten es, die Reaktion der Bäume auf das lokale Klimageschehen breit abgestützt zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass

Juli kam er im Hitzesommer fast vollständig zum Erliegen. Nach spätsommerlichen Niederschlägen erholten sich einige der Bäume wieder. Doch über das gesamte Jahr und alle 22 untersuchten Bäume betrachtet, lag der

durchschnittliche Safffluss der Eichen im Trockenjahr 2003 massiv unter jenem des vorangehenden Jahres. Im Jahr 2004, das sich klimatisch ebenfalls durch wenig Niederschlag aber moderatere Temperaturen als 2003 auszeichnete, lagen die Saffflusswerte zwischen jenen der beiden übrigen Jahre.

Nachbarbäume bieten Schutz

Zu Beginn der Wachstumsphase entwickelten sich die Bäume jeweils identisch. In allen drei verglichenen Jahren begannen die Eichen, ihre Blätter Ende März oder Anfang April auszutreiben. Im Herbst 2002 und 2004 setzte der Blattfall im Oktober ein und war Ende November abgeschlossen. Im Jahr 2003 hingegen wurde das gewohnte Muster völlig durchbrochen. Bedingt durch Trockenheit und Hitze hatten 90 Prozent der Eichen bereits im August zumindest einen Teil ihrer aktiven Blätter verloren. Die Blätter waren entweder verfärbt oder abgeworfen. 30 Prozent der Bäume hatten zu diesem Zeitpunkt gar bereits ihr gesamtes Blattwerk abgeworfen (Abbildung 4 „Klimaänderung“, Seite 7).

Interessanterweise zeigte sich, dass das Ausmass des Blattabwurfes stark von Einflussfaktoren in unmittelbarer Nähe der Bäume abhing. Ausschlaggebend war nämlich, wie viele und wie grosse Bäume in südlicher Richtung der betroffenen Bäume standen. Eichen mit wenigen und kleinen Nachbarbäumen im Süden waren der extremen Strahlung und Hitze am stärksten ausgesetzt. Da ihnen der Schatten durch Nachbarbäume fehlte, reagierten sie mit verstärktem Laubabwurf.

Zudem enthielten die im Sommer 2003 frühzeitig abgeworfenen Blätter viel mehr Nährstoffe (80 Prozent mehr Stickstoff und 120 Prozent mehr Phosphor), als die im Herbst 2002 abgeworfenen. Grund: Den unter Trockenstress stehenden Bäumen war es nicht im selben Mass möglich, Nährstoffe aus den Blättern abzutransportieren, wie in einem normalen Jahr. Die Vermutung liegt nahe, dass die abgeworfenen Nährstoffe dem Baum auch im folgenden Jahr nicht zur Verfügung standen.

Eichenblätter sind bekannt für ihre langsame Zersetzung. Zudem trägt trockenes Klima dazu bei, dass die Nährstoffe in Blättern nicht sofort in den Boden gelangen.

Sterberaten von Föhre und Eiche

Die Sterberaten der zwei häufigsten Baumarten im Untersuchungsgebiet, der Flaumeiche (*Quercus pubescens*) und der Föhre (*Pinus sylvestris*) unterschieden sich in der Periode von 2001 bis 2004 nicht voneinander. Bei beiden Arten starben pro Jahr etwa vier Prozent der Bäume. Bei den gestorbenen Föhren spielte es offenbar keine Rolle, ob sie innerhalb einer Gruppe von Bäumen standen oder nicht. Die Eichen hingegen starben vor allem dann, wenn sie von wenigen und kleinen Bäumen umgeben waren. Dabei war wiederum von entscheidender Bedeutung, in welcher Himmelsrichtung diese Bäume standen. Eichen, die im Süden über viele Nachbarn verfügten, starben weniger häufig, als solche mit keinen oder wenigen südlichen Nachbarn. Wie beim vorzeitigen Laubverlust dürfte dieses Phänomen damit zu tun haben, dass sich schattenspendende Nachbarn auf die Entwicklung der Eichen positiv auswirken.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unsere Untersuchungen ein konsistentes Gesamtbild ergaben: Saffflussraten, Blattzustand und Sterberaten belegten übereinstimmend, wie stark die Bäume durch die Trockenheit beeinflusst wurden. Konsequenzen für die Waldwirtschaft dürfte insbesondere der beobachtete grosse Einfluss der Nachbarbäume haben. Durch diese Tatsache lässt sich weitgehend erklären, weshalb die Vegetationsstruktur in Salgesch mit seinen offenen und bewaldeten Gebieten über die Zeit relativ stabil geblieben ist. Dies hat auch Folgen für die Zukunft: Eichen-Aufforstungen zum Beispiel als Schutzwald sollten nicht in regelmässigen Abständen geschehen, sondern am besten in einer Art geklumpfter räumlicher Anordnung.

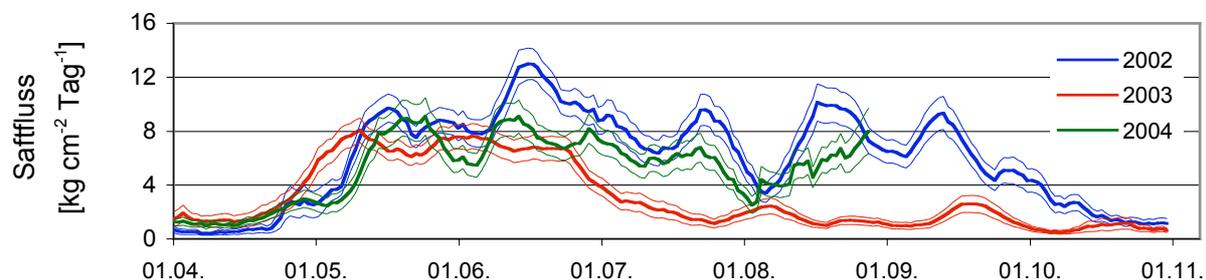


Abbildung 2. Der mittlere Safffluss von 22 Eichen in den Jahren 2002, 2003 und 2004. Ende Juni 2003 beginnt der Safffluss abzunehmen und kommt bis Ende Juli fast vollständig zum Erliegen. Im Jahre 2004 wurde nur bis und mit August gemessen. Die dünnen Linien sind die jeweiligen Standardfehler.

Trockenstress lässt sich in Bäumen mittels Ultraschallsensoren erfassen

Trockenstress verursacht bei Bäumen Reaktionen lange bevor äusserlich sichtbare Schäden auftreten, so zum Beispiel am Wasserleitsystem. Bei zu starkem Trockenstress reissen Wassersäulen in den Leitgefässen von Stamm und Ästen und verursachen dabei ein Ultraschallsignal, das mit technischen Hilfsmitteln erfasst werden kann. Untersuchungen in Salgesch und Jeizinen zeigten unter anderem, dass diese Signale bei zunehmender Trockenheit nicht proportional ansteigen. Je nach Anpassung der Bäume traten diese Schäden auch schon bei relativ feuchten Bedingungen auf.

Fabienne Zeugin und Roman Zweifel

Um die Blätter oder Nadeln im Kronenbereich ausreichend mit Wasser zu versorgen, muss ein Baum Wasser aus dem Boden über mehrere Meter in die Höhe transportieren – dies entgegen der Schwerkraft und ohne biochemisches Pumpsystem. Der Mechanismus,



Abbildung 1. Sensor zum Messen der Ultraschallsignale in Bäumen. Im Bild eine Walliser Föhre im Laborversuch.

der hinter diesem Wassertransport steckt, funktioniert vereinfacht gesagt so: Die Bäume geben über ihre Blätter laufend Wasserdampf in die Umgebung ab. Diese Transpiration führt zu einem Unterdruck oder anders gesagt zu einer Saugspannung. Diese sorgt dafür, dass das verdampfte Wasser durch Aufnahme neuen Wassers über die Wurzeln ersetzt wird. Der Transport verläuft dabei in zahlreichen Leitgefässen, im so genannten Xylem, wie das Stammholz im Fachausdruck heisst. Verbunden mit dem Xylem sind Wasserspeicher in Rinde und Blätter, die je nach Wasserverbrauch geleert und wieder gefüllt werden.

Sensoren machen Trockenstress hörbar

Verliert nun ein Baum während Trockenperioden mehr Wasser durch Transpiration, als vom Boden nachgeführt werden kann, ist ein zusammenhängender Fluss im Xylem nicht mehr gewährleistet. Konsequenz: Die Wassersäulen reissen, und Luft dringt ins Leitgefäss ein. Diesen Vorgang nennt man Kavitation. Das Ausmass von Kavitationen in einem Baum wird in der Ökophysiologie seit längerem als Mass für Trockenstress verwen-

det. Denn mit jedem Kavitationsereignis nimmt die Leitfähigkeit des Xylems ein wenig ab, und der Baum kann immer weniger Wasser transportieren.

Wenn Luft in ein Xylemgefäss gelangt, und die Wassersäule reisst, kommt es zu einem kurzzeitigen Bewegungsschoss, einem so genannten Schallemissionsereignis im Ultraschallbereich. Dieses Phänomen lässt sich mit geeigneten akustischen Sensoren verfolgen und grafisch darstellen (Abbildung 1). Die Methode nennt sich UAE-Aufzeichnung (Ultrasound Acoustic Emission Detection) und erlaubt es, die Kavitationsereignisse im Moment des Geschehens am lebenden Baum zu messen und so mit den aktuellen mikroklimatischen Bedingungen zu vergleichen.

Wasserleitsystem stösst an Grenzen

Während des Hitzesommers 2003 führten wir in Salgesch und Jeizinen von Juli bis Oktober Kavitationsmessungen an Flaumeiche und Waldföhre durch. An beiden Standorten wurden parallel dazu weitere ökophysiologische und sämtliche mikroklimatischen Daten

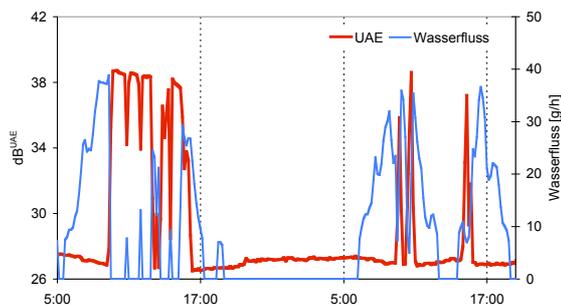


Abbildung 2. Typisches Ultraschall-Tagesmuster (UAE) einer Föhre in Salgesch. Mit dem Einsetzen der Kavitationssignale bricht der Wasserfluss massiv ein, erholt sich aber wieder, wenn die Signale verschwinden.

aufgezeichnet (Abbildung 2). Obwohl beide beobachteten Baumarten als trockenresistent gelten, regulieren sie, wie sich zeigte, ihren Wasserhaushalt anders („Stomataregulation“, Seiten 14-15). Die Waldföhre reagierte an trockenen und heissen Sommertagen stärker als die Flaumeiche dadurch, dass sie die Spaltöffnungen ihrer Blätter schloss. Überraschenderweise zeigten sich solche Unterschiede nicht auch bei den Kavitationsmessungen. Die beiden Arten liessen sich

anhand der Tagesmuster ihrer Schallemissionsaufzeichnungen nicht voneinander unterscheiden. Dies deutet darauf hin, dass die Wasserleitsysteme von Föhre und Eiche, obwohl holzanatomisch unterschiedlich, während extremen Bedingungen an vergleichbare Grenzen stiessen.

Hingegen liessen sich die Kavitationsmuster nach Standorten unterscheiden. Während in Salgesch der Messverlauf beider Arten ausgeprägte Spitzen aufwies, fielen die Unterschiede zwischen den Tag- und Nacht-signalen in Jeizinen relativ klein aus.

Hitze und Trockenheit sorgen gemeinsam für Stress

Das für die Fachwelt spannendste Resultat der Kavitationsmessungen von Salgesch und Jeizinen war, dass die akustischen Signale des Trockenstress nicht proportional vom Grad der Trockenheit abhingen. Frühere Untersuchungen waren in dieser Hinsicht zu anderen Schlüssen gekommen. Sie legten nahe, dass eine Reduktion des Wassergehalts im Baum immer auch eine Zunahme von Kavitationen zur Folge hatte. Dieses Phänomen konnte bei den Messungen im Wallis nicht

beobachtet werden. Während der zunehmenden Trockenheit im Hitzesommer 2003 wurden die Kavitationsereignisse weder zahlreicher, noch fielen die Signale stärker aus. Dies deutet darauf hin, dass in einem Baum, der bereits unter Trockenstress steht, die Kavitationen nur noch dann zunehmen, wenn sich zusätzlich die Umweltdingungen weiter ins Extreme verschärfen. Das heisst, wenn es noch trockener und noch heisser wird (Abbildung 3).

Kombination von Faktoren

Anhand eines einfachen physiologischen Modells, das im Wesentlichen auf Wasserflüssen, Fließwiderständen und Potentialen beruht, konnten wir zeigen, dass Kavitation nicht von einem einzelnen Faktor wie hohen Temperaturen oder fehlendem Niederschlag ausgelöst wird (Abbildung 4). Entscheidend ist immer die Kombination von mehreren Faktoren. Es liess sich damit auch erklären, warum Kavitation, je nach Anpassung der Bäume, auch schon bei relativ feuchten Bedingungen auftrat.

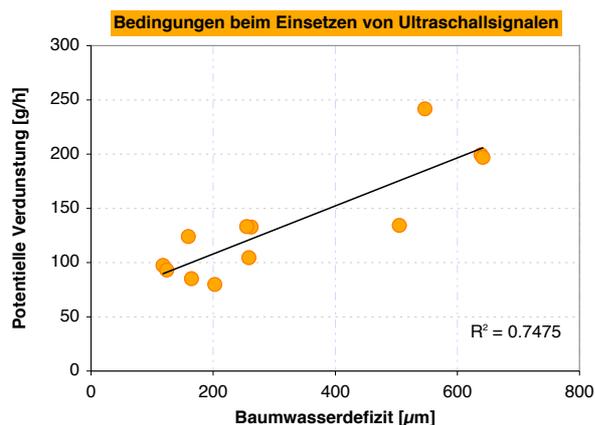


Abbildung 3. Überraschendes Resultat: Je grösser der Trockenstress und damit das Baumwasserdefizit bereits ist, desto extremer müssen die klimatischen Bedingungen wie die potentielle Verdunstung sein, damit weitere Kavitationen auftreten (Flaumeiche, Salgesch).

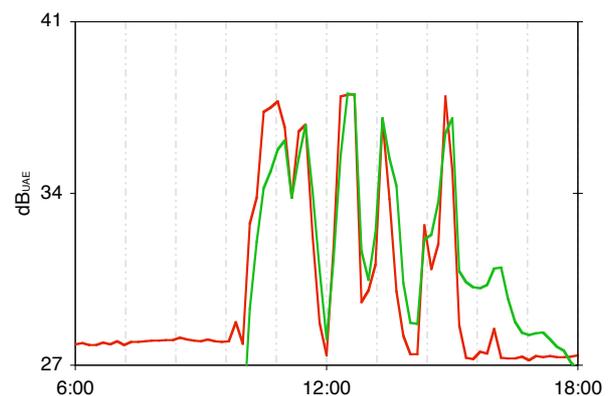


Abbildung 4. Vergleich zwischen dem gemessenen und modellierten Ultraschall-Verlauf einer Eiche an einem bewölkten Tag in Salgesch.

Mistelbefall sorgt bei Waldföhren für erhöhten Trockenstress

Misteln entziehen ihren Wirtsbäumen, den Waldföhren, grosse Mengen Wasser, ohne dass sich diese dagegen wehren können. Diese zusätzliche Verdunstung kann bei den befallenen Bäumen je nach klimatischen Bedingungen ein gefährliches Wasserdefizit verursachen und so speziell in den südexponierten Lagen des Walliser Rhonetals zu einem zusätzlichen Stress für Waldföhren führen.

Sara Bangerter und Roman Zweifel

Der Mistelbefall der Waldföhre im Wallis hat in den letzten 20 Jahren stark zugenommen (Abbildung 1). Beobachtungen durch Förster und Untersuchungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL zeigen, dass bis zu 90% aller Föhren von Misteln befallen sind. Parallel zu diesem Befall hat in der Region eine Verschiebung von offenen Föhrenwäldern hin zu Eichen-Laubwäldern stattgefunden.



Abbildung 1: Die Föhrenmistel ist direkt mit dem Wasser- und Nährstoffhaushalt des Wirtsbäumchen verbunden.

den. Die Frage liegt also nahe: Haben die Misteln etwas mit dem schlechten Zustand der Föhrenwälder im Wallis zu tun?

Misteln entziehen Wasser und Nährstoffe

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der Universität Bern wurden im Jahr 2004 die ökophysiologischen Wechselwirkungen zwischen Mistel (*Viscum album* ssp. *austriacum*) und Föhre (*Pinus sylvestris*) untersucht (Abbildung 2). Dabei galt das besondere Interesse dem zusätzlichen Wasserverbrauch, den die Mistel verursacht und der Frage, wie stark dies die Föhre beeinflusst.

Die Föhrenmistel ist ein Halbparasit, der für die Wasser- und Nährstoffversorgung von seinem Wirt abhängig ist, jedoch durch Photosynthese selber Kohlenstoff aus der Luft aufnimmt. Was den befallenen Föhren in dieser Situation besonders zu schaffen macht, ist der Umstand, dass die Mistel sehr viel Wasser verdunstet, ohne

dass der Wirtsbaum Einfluss darauf nehmen kann. Dies hat damit zu tun, dass die Mistel ihre Stomata genannten Spaltöffnungen in den Blättern kaum regulieren kann.

Da die Mistel direkt mit dem Wasserleitsystem des Baumes verbunden ist, aber über eine vom Baum unabhängige Regulierung der Stomata verfügt, ist es der befallenen Föhre nicht mehr möglich, ihren gesamten Wasserverbrauch selber zu regulieren. Der hohe Verbrauch der Mistel führt dazu, dass der Baum den vom Parasiten verursachten Wasserverlust durch das Schliessen der eigenen Stomata zu kompensieren versucht. Da aber bei geschlossenen Stomata kein Kohlendioxid mehr aufgenommen werden kann, kann die Föhre auch keine Photosynthese mehr betreiben. Dies führt zu einem empfindlichen Versorgungsengpass mit Kohlenstoff und Energie, auf die der Baum angewiesen ist. Er wird im Kampf ums Überleben geschwächt. Zudem fließen die im Wasser gelösten Nährstoffe aus dem Boden vermehrt in die Misteln und nicht in die Organe ihres Wirts. Bei eingestellter Verdunstung droht der Föhre zusätzlich eine Überhitzung der Nadeln und damit eine Schädigung ihres Photosyntheseapparates.



Abbildung 2: Sara Bangerter beim Messen von Mistelblattwasserpotentialen oberhalb von Salgesch, im Sommer 2004.

Verschwenderischer Umgang mit Wasser

Um den genauen Auswirkungen der Mistel auf die Föhre zu ermitteln, wurden von Parasiten befallene Äste mit

solchen ohne Misteln verglichen. Dabei zeigten sich die deutlichsten Unterschiede an besonders heissen Tagen in trockenen Perioden. Während sich die Stomata der Föhre morgens rasch schlossen, blieben diejenigen der Mistel weiter offen (Abbildung 3a). Dies ist ein klares Zeichen dafür, dass der Baum Wasser zu sparen ver-

Offensichtlich geht die Mistel das Risiko ein, ihren Wirt - und damit sich selbst - durch den Entzug beträchtlicher Wassermengen bei Trockenheit zusätzlich zu schädigen, um ihre Wasser- und Nährstoffversorgung auch kurzfristig zu gewährleisten. Den Preis für dieses Verhalten des Parasiten zahlt der Wirtsbaum. Das grössere

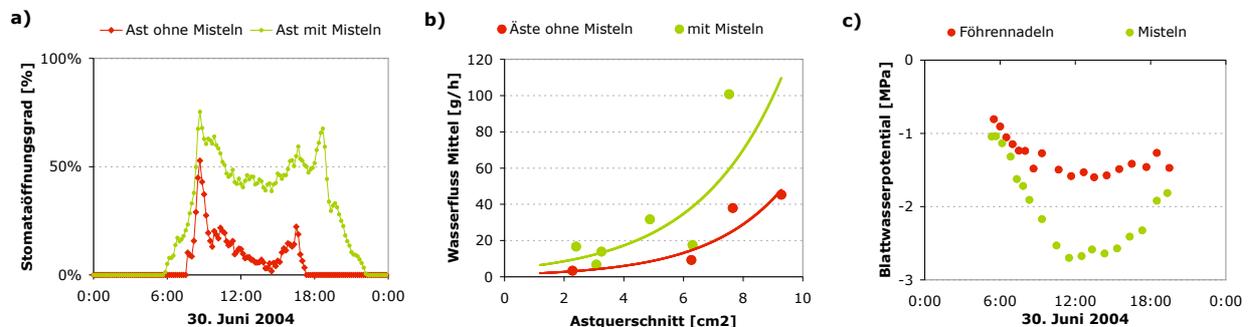


Abbildung 3: Föhrenzweige mit und ohne Misteln unterscheiden sich stark in ihren ökophysiologischen Charakteristika: **a)** Stomataöffnungsgrade an einem trockenen, heissen Tag, **b)** Wasserverbrauch pro Astdicke, **c)** Blattwasserpotentiale im Tagesgang.

suchte, während die Mistel offensichtlich kaum eine Regulation ihres Wasserverbrauchs vornahm. Wie die Untersuchungen in Salgesch zeigten, verbrauchten von Misteln befallene Äste über den gesamten Sommer deutlich mehr Wasser pro Astquerschnittseinheit als ihre nicht befallenen Nachbarn (Abbildung 3b).

Unterschiede im physiologischen Verhalten von Mistelblättern und Föhrennadeln konnten auch mittels so genannter Blattwasserpotential-Messungen nachgewiesen werden (Abbildung 3c). An heissen Tagen sanken die Blattwasserpotentiale der Misteln weiter ab, während diejenigen der Föhre kurz nach Sonnenaufgang ihren Tiefpunkt erreichten und dann, begründet durch die geschlossenen Stomata, für den Rest des Tages stagnierten.

Zwei unterschiedliche Strategien

Dieses Verhalten zeigt, welches ungleiche Paar Wirt und Parasit sind und welche unterschiedlichen Strategien sie im Umgang mit Wasser verfolgen. Die Föhre war während trockenen Perioden schon am Morgen gezwungen, ihre Stomata zu schliessen und damit ihren Stoffwechsel zu reduzieren. Dagegen zeigten sich die Misteln von Trockenheit relativ unbeeindruckt. Ihre Stomata blieben auch dann noch offen, wenn die Föhre unter deutlichem Trockenstress litt.

Baumwasserdefizit und der Produktivitätsverlust der Föhre wirken sich negativ auf ihre Fitness aus. Je stärker sie von Misteln befallen ist, desto grösser ist dieser schädliche Effekt.

Föhrensterben und Mistelbefall

Dass allein der starke Mistelbefall zum Absterben einer Föhre oder gar eines ganzen Bestandes führen kann, ist praktisch auszuschliessen. Beim Absterben der Bäume spielen ganz unterschiedliche Faktoren eine Rolle. So begünstigt zum Beispiel der Umstand, dass im Wallis während der vergangenen hundert Jahre die Durchschnittstemperaturen gestiegen sind, wärmetolerantere Arten wie die Flaumeiche und den Wachholder. Dies erhöht den natürlichen Konkurrenzdruck auf die Föhre. Die Föhren scheinen auch besonders unter Extremereignissen wie dem Hitzesommer 2003 zu leiden. Starke Nadelverlichtungen sind erste Anzeichen einer Schwächung und führen unter anderem dazu, dass solche bereits entkräfteten Bäume vermehrt von der licht- und wärmeliebenden Mistel befallen werden. Aber auch schädliche Insekten machen sich über sie her. Erst die Kombination all dieser Faktoren kann mittel- bis langfristig zum Tod eines Baumindividuums führen. Die Mistel ist nur ein Faktor unter vielen.

Dank

Im Namen aller Beteiligten möchten wir uns ganz herzlich für die grossartige Akzeptanz und Hilfsbereitschaft bedanken, die wir rund um die Orte Salgesch, Gampel und Jeizinen erfahren haben. Namentlich erwähnen möchten wir:

Viktor Bregy, Direktor der Dienststelle für Wald und Landschaft, Kreis IV, Gampel.
Louis Glenz, Präsident Burgergemeinde, Salgesch
Jean-Claude Brunner, Präsident Wald, Burgergemeinde Salgesch
Konrad Egger, Förster, Salgesch
Hugo Rinaldo, Förster, Gampel

Für die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Form dieser Broschüre geht ein ganz grosses Dankeschön an:

Kaspar Meuli, zuständig für Öffentlichkeitsarbeit beim NFS Klima.

Beteiligte Personen und Institutionen

Folgende Personen waren direkt in die Forschungsarbeiten in den Jahren 2001 bis 2005 involviert:

Projekt *Thermoak* (finanziert durch den NFS Klima und das Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Bern).

Prof. Dr. David Newbery, Universität Bern, Projektleiter.
Prof. Dr. Urs Feller, Universität Bern.
Dr. Pierre Haldimann, Universität Bern.
Lukas Zimmermann, Universität Bern.
Alexander Gallé, Universität Bern.
Fabienne Zeugin, Universität Bern.
Wolfgang Bischoff, Universität Bern.
Marlise Zimmermann, Universität Bern.
Ernst Bhend, Universität Bern.

Projekt *Paläoökologie* (finanziert durch das Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Bern).

PD Dr. Willy Tinner, Universität Bern, Projektleiter.
Simone Hofstetter, Universität Bern.
Marco Conedera, FNP Sottostazione Sud delle Alpi, Bellinzona.
Dr. Thomas Wohlgemuth, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.

Projekt *Tree response to climate change* (finanziert durch das Bundesprogramm zur Förderung des akademischen Nachwuchses, das Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Bern, den NFS Klima und weitere beteiligte Institute).

Dr. Roman Zweifel, Universität Bern, Projektleiter.
Prof. Dr. Frank Sterck, Universität Wageningen, NL.
Dr. Andreas Rigling, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
Dr. Matthias Dobbertin, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
Dr. Kathy Steppe, Universität Ghent, B.
Sara Bangerter, Universität Bern.
Alfred Chitiki, Universität Wageningen, NL.
Simone De Brock, Universität Wageningen, NL.
Marijn Zwart, Universität Wageningen, NL.
Qumruzzaman Chowdhury, Universität Wageningen, NL.

Kontaktadressen

<i>Tree response to climate change</i>	<i>Paläoökologie</i>	<i>Thermoak</i>	<i>NFS Klima</i>
Roman Zweifel www.natkon.ch	Willy Tinner Institut für Pflanzenwissenschaften	David Newbery Institut für Pflanzenwissenschaften	Kaspar Meuli NFS Klima Management Center
Lüeholz 33 8634 Hombrechtikon	Altenbergrain 21 3013 Bern	Altenbergrain 21 3013 Bern	Erlachstr. 9a 3012 Bern
079 703 04 91 roman.zweifel@natkon.ch www.natkon.ch	031 631 49 32 willy.tinner@ips.unibe.ch www.ips.unibe.ch/paleo	031 631 88 15 david.newbery@ips.unibe.ch www.ips.unibe.ch/vegeco	031 631 31 49 meuli@giub.unibe.ch www.nccr-climate.unibe.ch

Publikationen

- Bangerter S.** 2005. Der Einfluss der Mistel (*Viscum album*) auf den Wasserhaushalt der Föhre (*Pinus sylvestris*) an einem Trockenstandort im Wallis, Schweiz. Diplomarbeit, Universität Bern.
- Haldimann P., A. Gallé, U. Feller.** 2005. Impact of drought and heat stress on the photosynthetic apparatus of *Quercus pubescens*: a field study. In: *Photosynthesis: Fundamental Aspects to Global Perspectives*, A. van der Est and D. Bruce (Eds), pp 601-603.
- Haldimann, P. and U. Feller.** 2004. Inhibition of photosynthesis by high temperature in oak (*Quercus pubescens* L.) leaves grown under natural conditions closely correlates with a reversible heat-dependent reduction of the activation state of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase. *Plant, Cell and Environment*. 27, 1169-1183.
- Tinner, W., S. Hofstetter, F. Zeugin, M. Conedera, T. Wohlgemuth, L. Zimmermann and R. Zweifel.** 2006. Long-distance transport of macroscopic charcoal by an intensive crown fire in the Swiss Alps – implications for fire history reconstruction. *Holocene*. 16, in press.
- Zeugin, F.** 2004 Trockenstress-Untersuchung an Flaumeiche und Waldföhre im Wallis mittels der Ultrasonic Acoustic Emission-Technik. Diplomarbeit, Universität Bern.
- Zweifel, R., L. Zimmermann and D.M. Newbery.** 2005. Modeling tree water deficit from microclimate: an approach to quantifying drought stress. *Tree Physiology*. 25, 147-156.