

Marco Conedera Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)\*

Willy Tinner Oeschger Zentrum für Klimaforschung und Institut für Pflanzenwissenschaften, Universität Bern (CH)

## Long-term fire ecology of Switzerland

Understanding past natural and anthropogenically induced forest fires and their long-term impact on the environment is a prerequisite for modern fire management. Thanks to modern paleoecological approaches it was possible to reconstruct the long-term role of fire for ecosystems, landscape properties and functions in various parts of Switzerland. In order to test and calibrate the paleoecological approach on a local scale, we compared the forest-fire statistics of the last 70 years around the small Lago di Origlio (southern Switzerland) with the yearly charcoal influx in the lake sediments. We demonstrated that the yearly deposition of microscopic charcoal particles (0.01–0.2 mm) correlates well with the regional forest-fire frequency 20 to 50 km around the lake, whereas macroscopic charcoal particles (> 0.2 mm) matched local fire events within a 2 km distance. Furthermore, the pilot study of lake Origlio provided insights into the different origins of forest fires and their long-term impact on vegetation. Studies in other areas in Switzerland suggest that the long-term effects of forest fire are not limited to the southern slope of the Alps, but also concern the forests of the Swiss Plateau and the Alps. There, the diffusion of fire-sensitive tree species such as *Ulmus spp.*, *Tilia spp.*, *Fraxinus spp.*, *Acer spp.* at the colline to mountain level, as well as *Abies alba* and *Pinus cembra* at the subalpine level was significantly reduced compared to the natural environmental conditions prior to the beginning of widespread slash and burn practices. The abundance reduction of tree species during the past millennia occurred in the southern and the northern Alps, on the Swiss Plateau, but not in the fire-prone dry valleys of the central Alps, where forest fires were more frequent naturally and exerted relevant ecosystem functions. Our results show that without considering sedimentary paleoenvironmental information it is hardly possible to gain correct assessments of current and future fire, environmental and forest dynamics. The implementation of paleoecological results into practical management activities is thus indispensable, especially in the view of the expected climatic changes.

**Keywords:** global change, climate change, fire, forest dynamics, natural vegetation, environmental reactions, silviculture, nature conservation

**doi:** 10.3188/szf.2010.0424

\* Via Belsoggiorno 22, CH-6500 Bellinzona, E-Mail marco.conedera@wsl.ch

Wald- und Buschbrände entstehen durch komplexe Wechselwirkungen zwischen natürlichen und menschlichen Faktoren. Biotische Faktoren wie Brandgutmenge und Entflammbarkeit, abiotische wie Wetterbedingungen, Blitzschlag und Relief sowie menschliche wie Landnutzung, Brandlegung, Präventions- und Bekämpfungsmassnahmen spielen dabei die Hauptrolle. Die soziale Bedeutung der Wald- und Buschbrände ist fest mit der sozioökonomischen Entwicklung des betroffenen Gebiets verbunden und variiert deshalb mit der Zeit (Pyne et al 1996). Zum Beispiel entstand in Europa nach dem Ersten Weltkrieg ein erstes allgemeines Bewusstsein für die Problematik der Waldbrände (Sulli 1987, IIA 1933).

Erstaunlicherweise nahmen zur selben Zeit überall im europäischen Mittelmeergebiet (nicht aber im nordafrikanischen Mittelmeergebiet bei vergleichbaren Klima- und Vegetationsbedingungen) die Wald- und Buschbrände zu. Diese Entwicklung, die auch die italienische Schweiz betraf, wurde hauptsächlich durch die Aufgabe der traditionellen Nutzung der ländlichen Gebiete und die Zunahme brachliegenden Landes verursacht. Einerseits führte die Konzentration der Bevölkerung in den urbanen Gebieten zu einer Zunahme der Schnittstellen zwischen Siedlungen und Busch- respektive Waldgebieten, andererseits bewirkten die verminderten waldbaulichen und landwirtschaftlichen Tätigkeiten eine Erhöhung der brennbaren Biomasse. Diese Kombi-

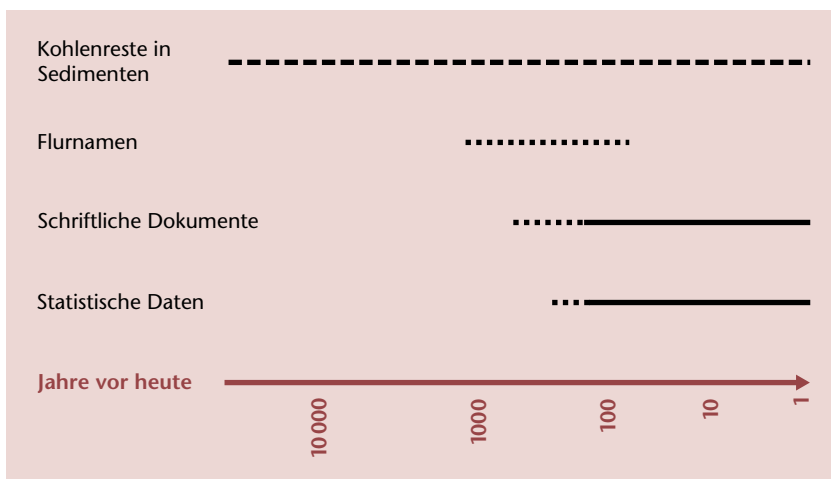


Abb 1 Methodische Ansätze zur Rekonstruktion des Feueregeschehens und deren räumliche und zeitliche Auflösung.

nation führte zu einer starken Zunahme der Waldbrände (Sulli 1987, Conedera & Tinner 2000, Vélez & Merida 2002, Castellnou et al 2002, Neff et al 2004). Dank effektiver Brandbekämpfung konnten die meisten Brände in der italienischen Schweiz (und auch in Südeuropa) in einem frühen Stadium gelöscht werden (Conedera et al 2004). Die wenigen Brände jedoch, die ausser Kontrolle gerieten, waren meist ausserordentlich gross und hatten besonders in Jahren mit extrem trockenen Witterungsverhältnissen verheerende ökonomische und ökologische Folgen (Conedera et al 2009).

Diese scheinbar widersprüchliche Entwicklung – Zunahme der Brandheftigkeit trotz verstärkter Waldbrandbekämpfung – wird auch als Feuerparadox (fire paradox) bezeichnet (Castellnou et al 2002). Um dem Feuerparadox entgegenzuwirken, wurde in den vergangenen Jahrzehnten das Feuermanagement als integrierender Ansatz mit einer geplanten und koordinierten Führung aller Brandbekämpfungstätigkeiten eingeführt (Barney 1975).

Ein zentrales Element des modernen Feuermanagements ist das detaillierte wissenschaftliche Verständnis der natürlichen, historischen und anthropogenen Funktionen der Brände, die über Jahrhunderte und Jahrtausende zur aktuellen Landschaft und zu den heutigen Ökosystemen geführt haben. Informationen dazu liefern historische Quellen wie zum Beispiel schriftliche Archive und sogenannte natürliche Archive wie Seesedimente, Moorablagerungen oder Baumringreihen, in denen direkte oder indirekte Spuren der ehemaligen Waldbrände erhalten blieben, die mit naturwissenschaftlichen Methoden untersucht werden können.

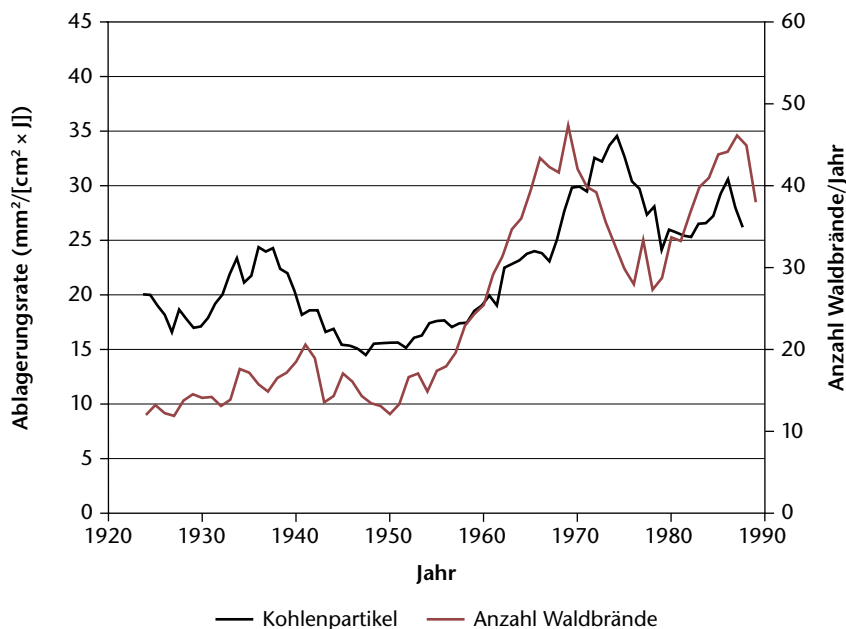
Im letzten Jahrzehnt wurden in den Umweltwissenschaften und insbesondere in der Paläoökologie vielfältige Ansätze entwickelt, die eine holistisch-quantitative Erfassung der Rolle der Feuer über lange bis sehr lange Zeiträume ermöglichen (Übersicht in Conedera et al 2009). Diese neuen Techni-

ken und die daraus resultierenden Informationen rücken wir in unserem Beitrag in den Mittelpunkt, soweit sie in der Schweiz bereits eingesetzt wurden. Das wissenschaftliche Feld der Feuer- und Feuerfolgenrekonstruktion ist sehr dynamisch und im Rahmen der Global-Change-Forschung international in starkem Wachstum begriffen.

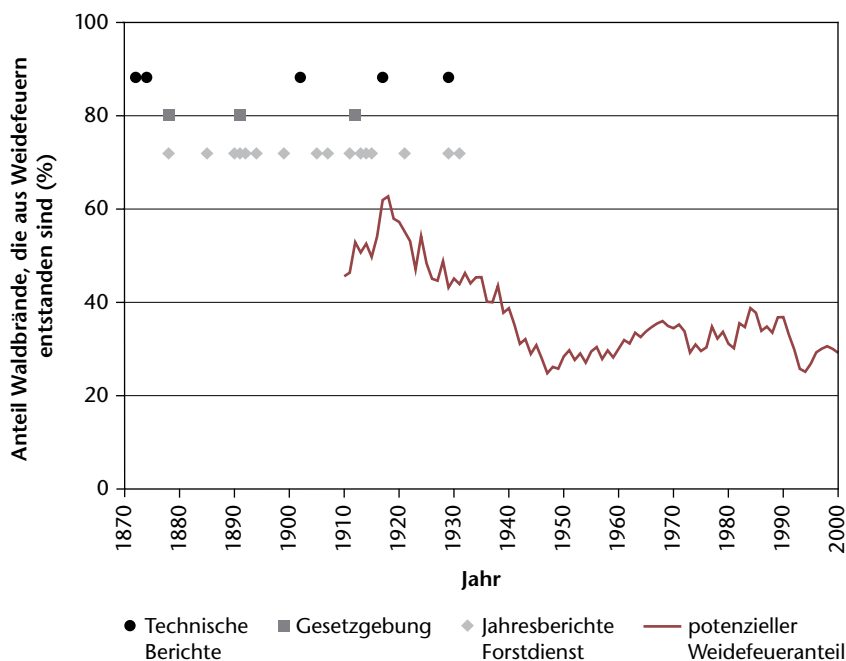
## Methodische Aspekte

Zur Rekonstruktion der Feuergeschichte und Feuerökologie (Wechselwirkungen zwischen Feuer und Umwelt) können viele Methoden eingesetzt werden. Deren Wahl hängt vor allem von der Fragestellung ab. Je nach Methode können verschiedene Zeitabschnitte mit verschiedenen räumlich-zeitlichen Auflösungsgraden erfasst werden (Abbildung 1). Jedoch ermöglicht es einzig der paläoökologische Ansatz, die Feuer- und Umweltgeschichte einer Region über Jahrtausende (holistisch-quantitativ und lückenlos) zu rekonstruieren (Conedera et al 2009). Diese Langzeitbetrachtung ist unumgänglich, da sich gewisse Fragen, wie beispielsweise «Welche Brandhäufigkeiten sind natürlich?» oder «Welcher Vegetationstyp kommt in einem bestimmten Raum natürlich vor?» nur aus paläoökologischer Perspektive empirisch beantworten lassen (Willis & Birks 2006).

Beim paläoökologischen Verfahren werden Informationen aus Feuchtablagerungen, zum Beispiel in Mooren und Seen, gewonnen, indem Mikro- und Makrofossilien wie Holzkohle, Pollen, Früchte, Blätter, Insekten oder andere Tierreste, organisches Material wie Benzole, Huminsäuren, Harze, Säuren, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Dibenzofurane, Levoglukosane, Benzene oder Polycarboxylsäuren und anorganische Komponenten wie Sauerstoffisotope, Korngrößen oder Metalle tiefenabhängig bestimmt und quantifiziert werden. Durch die Datierung ausgewählter Materialien aus verschiedenen Tiefen, zum Beispiel terrestrischer Pflanzenreste mithilfe der Radiokarbonmethode, kann mittels physikalischer Methoden ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) das absolute Alter der Proben bestimmt werden. Durch das (z.B. lineare) Interpolieren der Ergebnisse in einem Alterstiefenmodell (Heegaard et al 2005) entstehen Umweltzeitreihen, die es beispielsweise erlauben, die Feuer- und Vegetationsgeschichte zu rekonstruieren. Diese Zeitreihen können mittels Korrelations- und Zeitreihenanalyse (z.B. Kreuzkorrelationen) quantitativ ausgewertet werden. Werden feuer- und vegetationsgeschichtliche Datenreihen verglichen, kann der Einfluss des Feuers auf die Pflanzendecke rekonstruiert werden. Für weitere Details zur feuerökologischen Methodik wird für die Schweiz auf Tinner et al (1998, 1999, 2005a) und Gobet et al (2003), für das Mittelmeergebiet auf Colom-



**Abb 2** Vergleich zwischen den Waldbränden im Sottoceneri (Waldbranddatenbank) mit dem jährlichen mikroskopischen Holzkohleeintrag (Influx) im Seesediment des Lago di Origlio für die Periode 1920 bis 1990. Die Kurven entsprechen neunjährigen gleitenden Mitteln (angepasst aus Tinner et al 1998).



**Abb 3** Weidefeuer im Kanton Tessin für die Periode 1870 bis 2000: Hinweise in technischen Berichten, gesetzlichen Erlassen und Jahresberichten des Forstdienstes sowie Anteil der Waldbrände, die seit 1910 potenziell aus Weidefeuern entsprungen sind. Als Ursache gelten Fahrlässigkeit oder Brandstiftung in den Monaten November bis Dezember (angepasst aus Conedera et al 2004).

baroli et al (2007, 2008, 2009) und Vannièrè et al (2008) verwiesen. Neuste Verfahren ermöglichen es, Brandhäufigkeiten in der Vergangenheit quantitativ (z.B. Anzahl Brände/1000 Jahre) abzuschätzen (z.B. Stähli et al 2006). Dieser Ansatz liefert wertvolle Hinweise auf natürliche oder anthropogene Feuerregimes und deren Wirkungen auf die Vegetation in der Schweiz.

## Eichung der sedimentären Methode

Um die sedimentäre Methode lokal zu eichen und zu überprüfen, haben wir für das Gebiet um den Lago di Origlio im Südtessin die Waldbrandstatistik des Sottoceneri mit dem jährlichen Holzkohleeintrag (Influx) im Seesediment verglichen. Dabei korrelierten die mikroskopischen Holzkohleteilchen (0.01 bis 0.2 mm) mit den regionalen Waldbrandhäufigkeiten im Umkreis von etwa 20 bis 50 km und die makroskopischen Holzkohleteilchen ( $> 0.2$  mm) mit den lokalen Waldbrandhäufigkeiten im Umkreis von rund 2 km (Tinner et al 1998).

Der abrupte Anstieg der Waldbrandhäufigkeit zwischen 1950 und 1970, ein erster Höhepunkt um das Jahr 1970 sowie ein zweiter Anstieg um 1987 sind sowohl in der historischen Waldbrandstatistik wie auch in den sedimentären Holzkohleleiten dokumentiert (Abbildung 2). Die beiden Kurven weisen aber auch gewisse Unterschiede im Detailverlauf auf, die wie folgt erklärt werden können:

- Die Feuerzunahme und das erste Maximum erscheinen bei den Holzkohleleiten ungefähr sechs bis acht Jahre später als in der Waldbrandstatistik. Diese zeitliche Unstimmigkeit kann einerseits durch die Unschärfe der Blei-210-Datierung, andererseits durch die Zeitspanne, welche bis zur Ablagerung der feinen Holzkohleteilchen am Seegrund verstreicht, erklärt werden.

- Die scheinbare Überschätzung des Feuereschehens durch die Holzkohleteilchen vor 1940 kann, wie in Conedera et al (2007) besprochen, durch kontrollierte Weidebrände erklärt werden. Diese produzieren zwar mikroskopische Kohleteilchen, werden aber in der Waldbrandstatistik nicht erfasst. Im Tessin war diese Brandtätigkeit bis in die 1930er-Jahre von Bedeutung, um danach praktisch ganz zu verschwinden (Abbildung 3).

Diese Resultate aus der Südschweiz passen sehr gut zu Eichungen und Beobachtungen aus anderen Gegenden und Kontinenten sowie zu neusten physikalischen Holzkohleverbretungsmodellen (Conedera et al 2009). Sedimentäre Holzkohleteilchen können somit als hervorragender Indikator vergangener Brände betrachtet werden (Whitlock & Larsen 2001). Insbesondere ist es möglich, mittels einer zeitlichen Kalibration Waldbrandregimeparameter in der Vergangenheit (hier z.B. Feuerhäufigkeiten) bis in prähistorische Zeiten zurückzuverfolgen. Diese weit zurückliegenden Zeiten sind für das Feuermanagement, für den Waldbau und den Naturschutz besonders interessant, da damals natürliche oder quasi-natürliche Zustände unter heutigen oder künftigen Klimabedingungen (1 bis 2 °C wärmer als heute) herrschten. Somit erlaubt uns dieser Ansatz, auf der Basis empirischer (und räumlich-zeitlich reproduzierbarer) Daten die wichtige Frage zu diskutieren, in welche Richtung sich Feuerregime und

Vegetation unter verschiedenen Nutzungs- und Klimaszenarien in den nächsten Jahrzehnten bis Jahrhunderten entwickeln werden.

## Langzeitwirkung von anthropogenen Feuern

Feuerökologische Untersuchungen an verschiedenen Standorten in der Schweiz haben überraschend ergeben, dass die Vegetation auch in den

(heute) feuerarmen Regionen des Mittellands oder der Nordalpen von der Langzeitwirkung anthropogener Feuer geprägt ist (Tinner et al 2005b). Die früheren menschlichen Feuer wirkten sich stark verarmend auf die Waldvegetation des Mittellandes und der Nordalpen aus. Reiche Mischbestände wurden durch relativ feuerresistente, jedoch artenarme Bestände abgelöst. Relativ störungsresistente Baumarten wie Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Eichen (*Quercus robur*, *Q. petraea*) profitierten während Jahrtausenden und konnten sich in der kollinen und

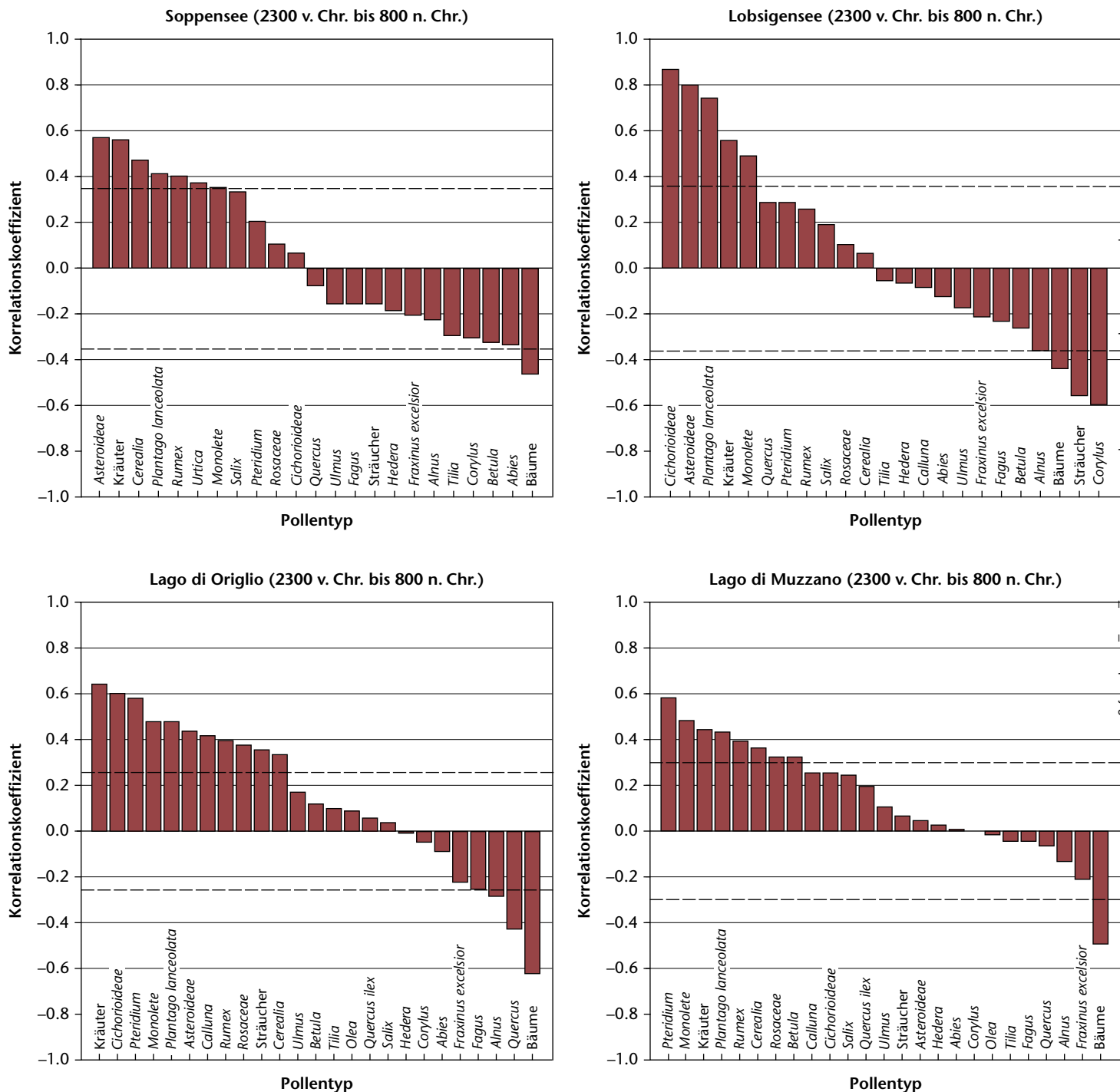


Abb 4 Korrelationen zwischen mikroskopischer Holzkohle und Pollentypen von der Bronzezeit bis ins Frühmittelalter, von 2300 v. Chr. bis 800 n. Chr., für vier verschiedene Standorte in der Schweiz. Arten mit positiven Korrelationskoeffizienten gewinnen mit zunehmender Feuerhäufigkeit an Bedeutung, Arten mit negativem Korrelationskoeffizient nehmen mit zunehmender Feuerhäufigkeit ab. Korrelationskoeffizienten ausserhalb der gestrichelten Linien sind signifikant ( $P < 0.05$ ).

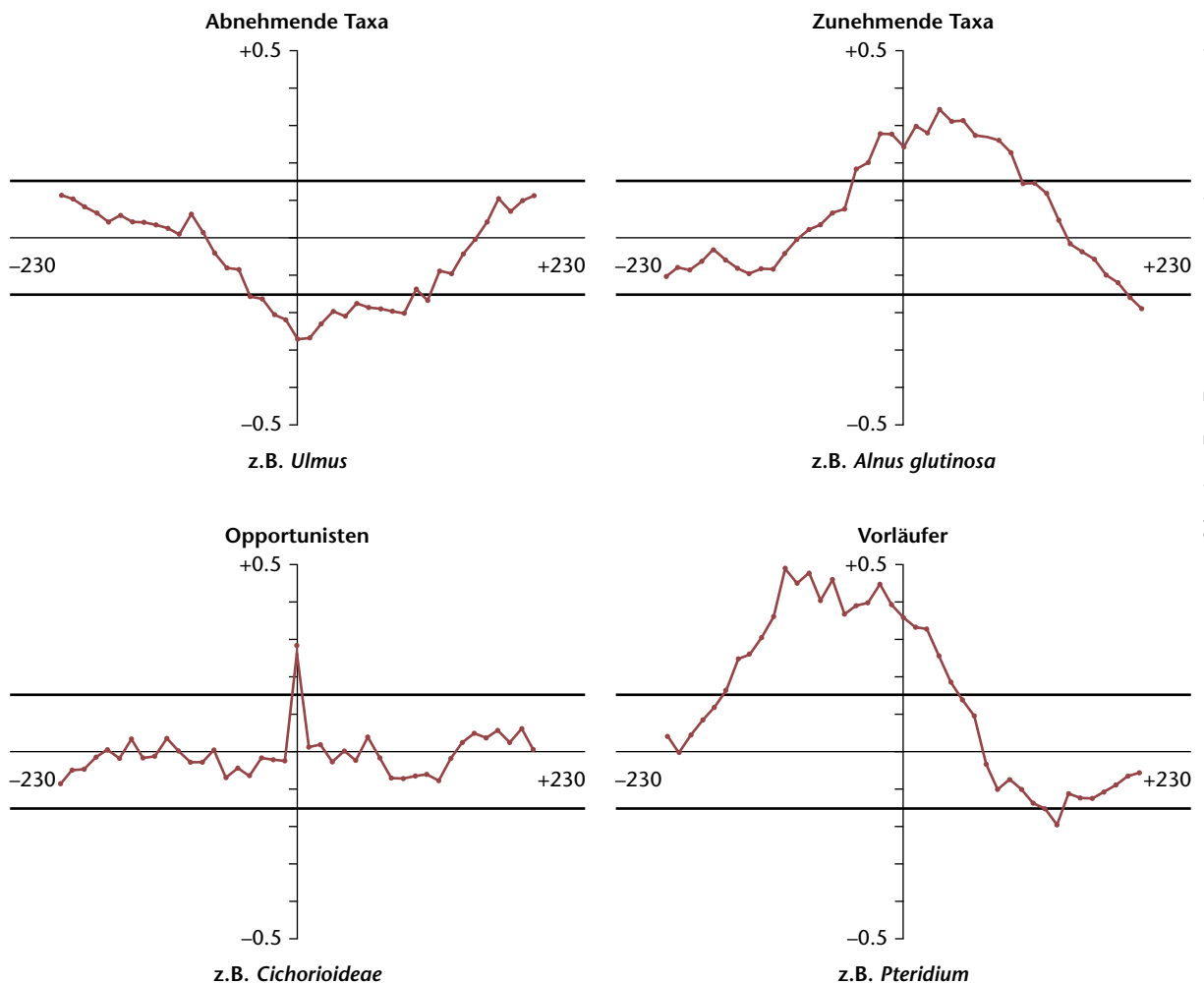
montanen Stufe des Mittellandes auf Kosten der ursprünglichen Waldvegetation durchsetzen. Diese Entwicklung wurde durch andere menschliche Tätigkeiten wie Eichelmast oder Holznutzung verstärkt. Eine ähnliche Entwicklung fand in der subalpinen Stufe der Nordalpen statt, wo sich im Laufe der Jahrtausende die Rottanne (*Picea abies*) durchsetzte.

Vor Beginn der Brandrodungen im Neolithikum spielten in der kollinen bis montanen Stufe Ulmen (*Ulmus spp.*), Linden (*Tilia spp.*), Esche (*Fraxinus excelsior*), Ahorne (*Acer spp.*) und Weisstanne (*Abies alba*) und in der subalpinen Stufe Weisstanne und Arve (*Pinus cembra*) eine viel wichtigere Rolle als heute (Details in Tinner & Ammann 2005). Im Gegensatz zur Abnahme der Baumartenvielfalt nahm die allgemeine Artenvielfalt zu. Viele offene Lebensräume wie Wiesen, Weiden und Äcker wurden erst durch menschliche Feuer geschaffen und während Jahrtausenden (künstlich) am Leben erhalten (Abbildung 4, Tinner et al 2005a, 2005b). Noch bedeutender war das Feuer in den Südalpen, wo die ur-

sprüngliche Pflanzendecke aufgrund anthropogener Brände (meist Rodungen) vollständig verschwand und der heutigen, stark störungs-, nutzungs- und feuerangepassten Vegetation Platz machen musste. Weniger überraschend ist hingegen der Befund, dass die Vegetation in den kontinentalen, von Natur aus zu Bränden neigenden Zentralalpen durch die Langzeitwirkung der Waldbrände kaum verändert wurde und auch heute noch als relativ naturnah und feuerangepasst betrachtet werden kann (Tinner & Ammann 2005). Es gibt sogar Hinweise dafür, dass die Waldbrände in diesen Regionen eine wichtige Rolle zur Erhaltung der Vielfalt der Wälder ausübten (Stähli et al 2006, Tinner et al 2005b).

## Menschliche Feuer als prägender Umweltfaktor

Ausserhalb der Zentralalpen haben sich nur an sehr abgelegenen Orten kleinste Reste der ursprünglichen Vegetation erhalten, die in der klassi-



**Abb 5** Kreuzkorrelationen zwischen mikroskopischer Holzkohle (Influx) und Pollenprozentwerten für verschiedene Taxa. Die horizontale Achse zeigt die Zeitschritte (1 Zeitschritt = ca. 12 Jahre). Die vertikale Achse zeigt die Korrelationskoeffizienten. Diejenigen ausserhalb der dicken, schwarzen Linien sind signifikant ( $P < 0.05$ ). Beispiele für vier verschiedene Reaktionsmuster: abnehmende Taxa unterstehen einem negativen Selektionsdruck durch Feuer, zunehmende Taxa einem positiven, Opportunisten haben kurz nach dem Feuer ihr Maximum, Vorläufer nehmen bereits vor dem Feuer zu, wahrscheinlich aufgrund menschlicher Aktivitäten.

schen vegetationsökologischen Literatur (z.B. Ellenberg 1996) interessanterweise aber nicht als solche erkannt wurden. Ein Beispiel hierfür sind kleine Weisstannenbestände in der kollinen Stufe der Südalpen, zum Beispiel bei Balladrum bei Arcegno auf 390 m ü. M., die heute mit laurophyllen Arten vergesellschaftet sind. Es ist anzunehmen, dass diese immergrünen Arten wie der Echte Loorbeer (*Laurus nobilis*) oder die Chinesische Hanfpalme (*Trachycarpus fortunei*) die freien Nischen besetzen, die durch das lokale Aussterben der immergrünen und thermophilen Elemente der ursprünglichen insubrischen Vegetation geschaffen wurden (Diskussion in Hofstetter et al 2006).

Paläoökologische Zeitreihen weisen darauf hin, dass der während zwei Jahrtausenden anhaltende Einfluss anthropogener Feuer vor rund 5000 Jahren zur Auslöschung der natürlichen Weisstannenbestände im kollinen Vegetationsgürtel der Südalpen (auch ausserhalb der Schweiz) führte (Tinner et al 1999). Die Zeitreihen wurden mittels Kreuzkorrelationen untersucht (Abbildung 5). Dabei konnten vier

statistisch signifikante Muster in der Vegetation gefunden werden, die mit Waldbränden assoziiert waren:

- Gewisse Pflanzentaxa nahmen aufgrund der Brände ab. Dazu gehören feuersensitive Gehölze wie Weisstanne (*Abies alba*), Linden (*Tilia spp.*), Esche (*Fraxinus excelsior*), Ahorne (*Acer spp.*), Ulmen (*Ulmus spp.*), Efeu (*Hedera helix*), Stechpalme (*Ilex aquifolium*) und Weinrebe (*Vitis*).
- Andere Taxa nahmen rund 10 bis 30 Jahre nach den Bränden zu, wie zum Beispiel Hasel (*Corylus avellana*), Weiden (*Salix spp.*), Holunder (*Sambucus spp.*) oder Erle (*Alnus glutinosa*). Dabei handelt es sich um Sträucher oder Bäume, die durch Stockausschlag schnell auf Feuer reagieren können.
- Verschiedene Kräuter nahmen in den ersten zehn Jahren nach dem Brand kurzfristig zu.
- Wieder andere Taxa wie zum Beispiel Spitzwegerich (*Plantago lanceolata*), Adlerfarn (*Pteridium aquilinum*), Beifuss (*Artemisia spp.*), Süssgräser (*Poaceae*), Nelkengewächse (*Caryophyllaceae*), Birken (*Betula spp.*) und Eichen (*Quercus spp.*) nahmen Jahr-

Pollentyp	Paläoökologische Feuerempfindlichkeit		Vergleich mit ökologischen Studien* (nur für mittlere Feuerhäufigkeit)	
	Mittlere Feuerhäufigkeit	Hohe Feuerhäufigkeit	Betroffenen Arten	Übereinstimmung
<i>Abies</i>	1	1	<i>Abies alba</i>	+
<i>Acer</i>	2	2	<i>Acer campestre</i> <i>Acer pseudoplatanus</i>	+ ++
<i>Alnus glutinosa t.</i>	5	3	<i>Alnus glutinosa</i>	+
<i>Betula</i>	5	3–4	<i>Betula pendula</i>	++
<i>Calluna</i>	4–5	6	<i>Calluna vulgaris</i>	+
<i>Castanea</i>	5	?	<i>Castanea sativa</i>	++
<i>Corylus</i>	5	3–4	<i>Corylus avellana</i>	–
<i>Fagus</i>	3	3	<i>Fagus sylvatica</i>	++
<i>Fraxinus excelsior t.</i>	2	2	<i>Fraxinus excelsior</i>	++
<i>Hedera</i>	1	1	<i>Hedera helix</i>	++
<i>Ilex</i>	1	1	<i>Ilex aquifolium</i>	++
<i>Quercus</i> (laubwerfend)	4	3	<i>Quercus pubescens</i> <i>Quercus petraea</i>	+/ +/-
<i>Salix</i>	5	3	<i>Salix caprea</i>	+
<i>Sambucus nigra t.</i>	5	5	<i>Sambucus nigra</i>	?
<i>Tilia</i>	2	2	<i>Tilia cordata</i> <i>Tilia platyphyllos</i>	++ +
<i>Ulmus</i>	2	2	<i>Ulmus glabra</i>	+
<i>Vitis</i>	2	2?	<i>Vitis sylvestris</i>	?
Monolete Farnsporen	5	6	?	?
<i>Pteridium aquilinum</i>	6	6	<i>Pteridium aquilinum</i>	++
Viele Krautarten ( <i>Poaceae</i> , <i>Asteraceae</i> , <i>Rosaceae</i> , <i>Anemone nemorosa</i> , <i>Humulus t.</i> , <i>Potentilla t.</i> , <i>Trifolium repens t.</i> usw.)	5	5	Viele Arten	++

**Tab 1** Feuerempfindlichkeit verschiedener Bäume und anderer Pflanzenarten aus paläoökologischen Studien am Lago di Origgio und am Lago di Muzzano in der Südschweiz (nach Tinner et al 2000). Übereinstimmungen: – keine Übereinstimmung mit ökologischer Literatur, + Übereinstimmung mit einer Quelle, ++ Übereinstimmung mit mehr als einer Quelle, ? keine Daten vorhanden. Feuerempfindlichkeit: 1 = feuerintolerant, 2 = feuerversehrt, 3 = feuersensitiv, 4 = feuerindifferent, 5 = feuergefördert, 6 = feuerangepasst. \* Z.B. Zuber (1979), Delarze et al (1992), Hofmann et al (1998).



zehnte bis Jahre vor den Bränden zu. Dabei handelt es sich um lichtliebende Pflanzen, die entweder auf menschliche Tätigkeiten oder Störungen in den Wäldern angewiesen sind (Spitzwegerich, Adlerfarn) oder durch offene, lichte Verhältnisse begünstigt werden (Beifuss, Süßgräser, Birken, Eichen). Das Aufkommen dieser Taxa deutet darauf hin, dass die Wälder bereits vor dem Auftreten der Feuer bewirtschaftet wurden. Somit können die menschlichen Tätigkeiten als Auslöser für die Feuer betrachtet werden. Archäologische Befunde aus dem Tessin unterstützten diese Interpretation. Paläoklimatische Reihen zeigten zudem, dass Landnutzung und Brände wahrscheinlich durch die Klimaentwicklung beeinflusst wurden; denn die anthropogenen Feuer ereigneten sich vorwiegend in warm-trockenen Klimaphasen (Tinner et al 1999).

Um die paläoökologischen Resultate besser interpretieren zu können, wurden diese mit Vegetationsaufnahmen aus dem Tessin verglichen. Mittels Chronosequenzen wurde die Wirkung des Feuers untersucht. Für die Vegetationsaufnahmen wurden Flächen gewählt, von denen aufgrund dendroökologischer Analysen bekannt war, wann sie von Waldbränden betroffen waren. Die Ergebnisse (Zuber 1979, Delarze et al 1992, Hoffmann et al 1998, Grund et al 2005) zeigen eine frappante Übereinstimmung mit den paläoökologischen Daten: In den letzten Jahrzehnten reagierten dieselben Taxa positiv oder negativ auf Waldbrände, welche laut den paläoökologischen Untersuchungen bereits vor Jahrtausenden durch Feuer gefördert oder verdrängt wurden. Aus dieser Übereinstimmung wurde eine erste Feuersensitivitätseinteilung für die Schweizer Vegetation abgeleitet (Tabelle 1, Tinner et al 2000), die zur dynamischen Modellierung vergangener Vegetationsreaktionen auf Waldbrände eingesetzt wurde (Keller et al 2002). Die Simulationsresultate bestätigten weitgehend die paläoökologische Interpretation, dass Waldbrände im Verlaufe der Jahrtausende zu einer radikalen Umprägung der Waldvegetation geführt haben.

Aus den paläoökologischen Resultaten lässt sich ableiten, dass unter natürlichen Verhältnissen und bei einem mit heute vergleichbaren oder leicht wärmeren (+1 bis 2 °C) Klima immergrüne Bäume und Sträucher wie Weisstanne, Eibe (*Taxus baccata*), Stechpalme und Efeu eine grosse Rolle spielten. Diese natürlichen Wälder der kollinen Stufe der Südalpen waren extrem vielfältig und einzigartig für Europa (Tinner & Ammann 2005).

Bevor sie durch Landnutzung und insbesondere Brandrodungen ausgelöscht wurden, erstreckten sich die südlichen, von der Weisstanne (ko)dominierten Wälder nach neusten Erkenntnissen bis nach Südeuropa ans Mittelmeer, wo sie – genügend Jahresniederschlag von 800 bis 900 mm vorausgesetzt – Mischbestände mit immergrünen Steineichen

bildeten (Colombaroli et al 2007). Daraus wird deutlich, dass die Weisstanne auch unter bedeutend wärmeren Klimabedingungen (+4 bis 6 °C) und bei zurückgehender Nutzung ein sehr starkes natürliches Potenzial in der Schweiz hat. Allerdings wird auch klar, dass dies nur dann gilt, wenn die (anthropogenen) Feuerhäufigkeiten in der Schweiz nicht signifikant höher werden als heute. Diese neusten Erkenntnisse werden im Tessin durch die entsprechend geschulte junge Förstergeneration im Waldbau bereits umgesetzt (persönliche Mitteilung von Gabriele Carraro). Die Weisstanne wird in der kollinen Stufe der Südschweiz nicht mehr als montaner «Exot», sondern vielmehr als sehr willkommener, wärmeliebender Rückkehrer wahrgenommen!

## Schlussfolgerungen

Paläoökologische Zeitreihen, die Jahrtausende zurückgehen, bilden bei Untersuchungen zur vergangenen und künftigen Umweltdynamik unerlässliche Datenquellen (Overpeck et al 2003, Oldfield & Alverson 2003, van Leeuwen et al 2008, Willis & Birks 2006). Ohne solche Langzeitdaten können den Fachleuten krasse Fehleinschätzungen bezüglich der laufenden und der künftigen Umwelt-, Feuer- und Walddynamik unterlaufen. Dies haben wir am natürlichen und künftigen Potenzial der Weisstanne in der Südschweiz und im Mittelmeerraum veranschaulicht.

In der Schweiz werden moderne paläoökologische Untersuchungen wie zum Beispiel Feuer- und Feuerökologierekonstruktionen nur an sehr wenigen Forschungsinstitutionen durchgeführt. Der vorliegende Beitrag soll das hohe Potenzial dieser modernen Umweltwissenschaft für die Forschung und die Praxis veranschaulichen. Eine praxisrelevante Umsetzung paläoökologischer Ergebnisse ist aber nur möglich, wenn Disziplinen und Forscher wie Forstwissenschaftler, Vegetationsökologen, Paläoklimatologen, Paläoökologen oder Modellierer, die bisher getrennt gewirkt haben, künftig eng zusammenarbeiten. Dies ist in der Schweiz bisher nur im Kanton Tessin gelungen. Wir hoffen angesichts der Dringlichkeit der auf uns zukommenden Veränderungen, dass dieser neue, integrierende Forschungsansatz auch in der Deutschschweiz und der Romandie erfolgreich umgesetzt werden kann.

Aufgrund der Klimaszenarien für die nächsten 90 Jahre scheint es klar zu sein, dass Feuer bei zukünftigen Vegetations- und Umweltveränderungen auch nördlich der Alpen eine Schlüsselrolle spielen wird. Die Alpensüdseite kann dabei als Versuchslabor zum besseren Verständnis künftiger Zustände in der restlichen Schweiz dienen. ■

Eingereicht: 23. Februar 2010, akzeptiert (mit Review): 21. August 2010

## Dank

Unser Dank geht an Gabriele Carraro, der sich seit mehr als zehn Jahren unermüdlich für die praxisrelevante Umsetzung paläoökologischer Ergebnisse einsetzt. Unsere Forschung wäre ohne die langjährige Unterstützung durch Brigitta Ammann, André F. Lotter und den Schweizerischen Nationalfonds (SNF) nicht möglich gewesen.

## Literatur

- BARNEY RJ (1975) Fire Management: a definition. *J Forest* 73: 498–519.
- CASTELLNOU M, SERCH MB, VELIMELIS LR (2002) Rethinking firefighting for the XXI century: a new firefighter model, fires of design, and fire ecology. *Luso: Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. 7 p.
- COLOMBAROLI D ET AL (2009) Response of broadleaved evergreen Mediterranean forest vegetation to fire disturbance during the Holocene: insights from the peri-Adriatic region. *J Biogeogr* 36: 314–326.
- COLOMBAROLI D, MARCHETTO A, TINNER W (2007) Long-term interactions between Mediterranean climate, vegetation and fire regime at Lago di Massaciuccoli (Tuscany, Italy). *J Ecol* 95: 755–770.
- COLOMBAROLI D, VANNIÈRE B, EMMANUEL C, MAGNY M, TINNER W (2008) Fire-vegetation interactions during the Mesolithic-Neolithic transition at Lago dell'Accesa, Tuscany, Italy. *Holocene* 18: 679–692.
- CONEDERA M ET AL (2004) La gestione degli incendi boschivi in Canton Ticino: tentativo di una sintesi storica. *Schweiz Z Forstwes* 155: 263–277. doi: 10.3188/szf.2004.0263
- CONEDERA M ET AL (2009) Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quat Sci Rev* 28: 435–456.
- CONEDERA M, TINNER W (2000) The interaction between forest fires and human activity in southern Switzerland. In: Innes JL, Beniston M, Verstraete MM, editors. *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*. Advances in global change research. Dordrecht: Kluwer. pp. 247–261.
- CONEDERA M, VASSERE S, NEFF C, MEURER M, KREBS P (2007) Using toponymy to reconstruct past land use: a case study of «brüsáda» (burn) in southern Switzerland. *J Hist Geogr* 33: 729–748.
- DELARZE R, CALDELARI D, HAINARD P (1992) Effects of fire on forest dynamics in southern Switzerland. *J Veg Sci* 3: 55–60.
- ELLENBERG H (1996) *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. Stuttgart: Ulmer. 1095 p.
- GOBET E, TINNER W, HOCHULI PA, VAN LEEUWEN JFN, AMMANN B (2003) Middle to Late Holocene vegetation history of the Upper Engadine (Swiss Alps): the role of man and fire. *Veg Hist Archaeobot* 12: 143–163.
- GRUND K, CONEDERA M, SCHRÖDER H, WALTHER GW (2005) The role of fire in the invasion process of evergreen broad-leaved species. *Basic Appl Ecol* 6: 47–56.
- HEEGAARD E, BIRKS HJB, TELFORD RJ (2005) Relationships between calibrated ages and depth in stratigraphical sequences: an estimation procedure by mixed-effect regression. *Holocene* 15: 612–618.
- HOFMANN C, CONEDERA M, DELARZE R, CARRARO G, GIORGETTI P (1998) Effets des incendies de forêt sur la végétation au Sud des Alpes Suisses. *Mitt Eidgenöss Forsch.anstalt Wald Schnee Landsch* 73: 1–90.
- HOFSTETTER S, TINNER W, VALSECCHI V, CARRARO G, CONEDERA M (2006) Lateglacial and Holocene vegetation history in the Insubrian Southern Alps – New indications from a small-scale site. *Veg Hist Archaeobot* 15: 87–98.
- IIA (1933) *Enquête internationale sur les incendies de forêts*. Rome: Institut International d'Agriculture. 457 p.
- KELLER F ET AL (2002) Effects of climate, fire, and humans on forest dynamics: forest simulations compared to the palaeological record. *Ecol Model* 152: 109–127.
- NEFF C, BASSING S, SCHEID A, JENTSCH C, FRANGER S (2004) Emploi du brûlage dirigé pour la protection de l'environnement et l'entretien du paysage – observations sur quelques exemples français (Pyrénées Orientales & Gard) et allemands (Raumschaft Schramberg Forêt Noire/Allemagne). Mannheim: Univ Mannheim, Materialien zur Geographie 24: 89–107.
- OLDFIELD F, ALVERSON KD (2003) The societal relevance of paleoenvironmental research. In: Alverson D, Bradley RS, Pedersen TF, editors. *Paleoclimate, global change and the future*. Berlin: Springer. pp. 1–11.
- OVERPECK J, WHITLOCK C, HUNTLEY B (2003) Terrestrial biosphere dynamics in the climate system: past and future. In: Alverson KD, Bradley RS, Pedersen TF, editors. *Paleoclimate, global change and the future*. Berlin: Springer. pp. 81–103.
- PYNE SJ, ANDREWS DL, RICHARD PL (1996) *Introduction to wildland fire*. New York: Wiley. 769 p.
- STÄHLI M, FINSINGER W, TINNER W, ALLGÖWER B (2006) Wildfire history and fire ecology of the Swiss National Park (Central Alps): new evidence from charcoal, pollen and plant macrofossils. *Holocene* 16: 805–817.
- SULLI M (1987) Gli incendi boschivi in Italia: tentativo di analisi quantitativa dall'Unità ad oggi sulla base della letteratura periodica forestale. *Arezzo: Istituto sperimentale per la selvicoltura, annali* 18: 291–333.
- TINNER W ET AL (1998) Pollen and charcoal in lake sediments compared with historically documented wildfires in southern Switzerland since AD 1920. *Holocene* 8: 31–42.
- TINNER W ET AL (2000) A palaeoecological attempt to classify fire sensitivity of trees in the southern Alps. *Holocene* 10: 565–574.
- TINNER W ET AL (2005A) Ausmass und Auswirkungen der Waldbrände auf die Vegetation im Laufe der Jahrtausende. *Schweiz Z Forstwes* 156: 325–330. doi: 10.3188/szf.2005.0325
- TINNER W, AMMANN B (2005) Long-term responses of mountain ecosystems to environmental changes: resilience, adjustment, and vulnerability. In: Huber UM, Bugmann H, Reasoner M, editors. *Global change and mountain research – state of knowledge overview*. Advances in global change research. Berlin: Springer. pp. 133–144.
- TINNER W, CONEDERA M, AMMANN B, LOTTER AF (2005B) Fire ecology north and south of the Alps since the last ice age. *Holocene* 15: 1214–1226.
- TINNER W, HUBSCHMID P, WEHRLI M, AMMANN B, CONEDERA M (1999) Long-term forest fire ecology in southern Switzerland. *J Ecol* 87: 273–289.
- VAN LEEUWEN JFN ET AL (2008) Fossil pollen as a guide to conservation in the Galapagos. *Science* 322: 1206–1206.



- VANNIÈRE B ET AL (2008) Climate versus human-driven fire regimes in Mediterranean landscapes: the Holocene record of Lago dell'Accesa (Tuscany, Italy). *Quat Sci Rev* 27: 1181–1196.
- VÉLEZ R, MERIDA JC (2002) Forest fire management in Spain: some examples of systematic analysis of a comprehensive database to improve effectiveness and efficiency. *Luso: Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. 7 p.

- WHITLOCK C, LARSEN C (2001) Charcoal as a fire proxy. In: Smol JP, Birks HJB, Last WM, editors. *Tracking environmental change using lake sediments. Terrestrial, algal, and siliceous indicators*. Dordrecht: Kluwer. pp. 75–97.
- WILLIS KJ, BIRKS HJB (2006) What is natural? The need for a long-term perspective in biodiversity conservation. *Science* 314: 1261–1265.
- ZUBER RK (1979) Untersuchungen über die Vegetation und die Wiederbewaldung einer Brandfläche bei Locarno (Kanton Tessin). *Beih Schweiz Z Forstwes* 65. 105 p.

## Langzeit-Feuerökologie der Schweiz

Ein zentrales Element des modernen Feuermanagements ist das detaillierte wissenschaftliche Verständnis der natürlichen, historischen und anthropogenen Ursachen der Brände und deren Wirkungen auf die Umwelt. Zusammen mit anderen Faktoren haben Feuer über Jahrhunderte und Jahrtausende zur aktuellen Landschaft und zu den heutigen Ökosystemen geführt. Dies ergaben moderne, paläoökologische Untersuchungen, die eine holistisch-quantitative Erfassung der Rolle der Feuer über lange bis sehr lange Zeiträume ermöglichen. Um paläoökologische Methoden lokal zu eichen und zu überprüfen, wurde für das Gebiet um den Lago di Origlio im Südtessin die Waldbrandstatistik der letzten 70 Jahre mit dem jährlichen Holzkohleeintrag (Influx) im Seesediment verglichen. Dabei zeigte sich, dass die mikroskopischen Holzkohleteilchen (0.01–0.2 mm) mit den regionalen Waldbrandhäufigkeiten im Umkreis von rund 20 bis 50 km korrelieren und die makroskopischen Holzkohleteilchen (> 0.2 mm) die lokalen Waldbrandhäufigkeiten im Umkreis von etwa 2 km wiedergeben. Ausgehend von den Pilotstudien im Tessin konnten für weitere Gebiete der Schweiz neue, wertvolle Einblicke in die natürlichen und anthropogenen Feuerregimes und deren langfristige Wirkungen auf die Vegetation gewonnen werden. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass die heutige Vegetation nicht nur auf der Alpensüdseite, sondern auch im schweizerischen Mittelland und in den Alpen durch die Langzeitwirkung des anthropogenen Feuers geprägt ist. Dadurch ist die heutige Verbreitung von feuerempfindlichen Baumarten wie Ulmen, Linden, Eschen und Ahornen in der kollinen und montanen Stufe sowie Weisstanne und Arve in der subalpinen Stufe viel geringer als unter den natürlichen Bedingungen, die vor Beginn der landwirtschaftlichen Brandtätigkeiten vorherrschten. Diese Verarmung der Waldvegetation über die Jahrtausende betraf die Südalpen, die Nordalpen und das Mittelland, nicht aber die von Natur aus zu Bränden neigenden Trockentäler der Zentralalpen, wo das Feuer eine wichtige natürliche ökologische Rolle spielt. Die Resultate zeigen deutlich, dass ohne paläoökologische Langzeitdaten eine korrekte Beurteilung der heutigen und der künftigen Umwelt-, Feuer- und Walddynamik nicht möglich ist. Die Umsetzung von paläoökologischen Ergebnissen in der Praxis ist angesichts der Veränderungen, welche mit dem Klimawandel auf uns zukommen werden, unentbehrlich.

## Ecologie du feu à long terme en Suisse

Comprendre l'histoire des incendies de forêt, qu'ils soient d'origine anthropique ou naturelle, et leur impact sur l'environnement est une condition essentielle à une gestion moderne des feux de forêt. Grâce aux techniques paléoécologiques modernes, il a été possible de reconstruire sur une longue période et à différents endroits en Suisse le rôle que les feux de forêt ont joué en matière de caractéristiques et de fonctionnement des écosystèmes et du paysage. Afin de tester et de calibrer l'approche paléoécologique à une échelle locale, nous avons comparé les statistiques des feux de forêt des 70 dernières années dans les environs du lac d'Origlio (Tessin) avec les dépositions annuelles (influx) de charbon dans les sédiments lacustres. Il a pu être démontré que les particules microscopiques de charbon (0.01–0.2 mm) sont corrélées avec la fréquence régionale des feux de forêt dans un rayon de 20 à 50 km, tandis que les particules macroscopiques (> 0.2 mm) correspondent aux incendies locaux ayant eu lieu à moins de 2 km de distance. En réitérant de telles études dans d'autres régions de Suisse, il a été possible de prouver que les effets sur le long terme des feux de forêt ne sont pas seulement limités au versant sud des Alpes, mais qu'ils sont également visibles dans les forêts du Plateau suisse et dans les Alpes. Dans ces deux régions, des espèces forestières pyrosensibles telles qu'*Ulmus spp.*, *Tilia spp.*, *Fraxinus spp.*, *Acer spp.* aux étages collinéen et montagnard ainsi qu'*Abies alba* et *Pinus cembra* à l'étage subalpin ont vu leurs zone de répartition diminuer de façon significative comparé à la période précédant le début des pratiques de brûlage anthropiques. Cette réduction de certaines espèces forestières au cours des millénaires passés sur le Plateau et sur les versants nord et sud des Alpes n'a par contre pas été observée dans les vallées sèches des Alpes centrales où le feu a toujours eu un effet sélectif sur la végétation et fait partie des contraintes des écosystèmes. Nos résultats démontrent que la prise en considération des informations paléo-environnementales est essentielle à l'évaluation correcte des dynamiques environnementales, forestières et des incendies de forêt du présent et du futur. L'utilisation des résultats paléoécologiques dans le cadre d'activités pratiques de gestion est donc indispensable, en particulier dans la perspective des changements climatiques à venir.