

# Waldbrandmodellierung – Möglichkeiten und Grenzen

**Patrick Weibel** Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich (CH)\*  
**Ché Elkin** Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich (CH)  
**Björn Reineking** Zentrum für Ökologie und Umweltforschung, Universität Bayreuth (DE)  
**Marco Conedera** Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)  
**Harald Bugmann** Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich (CH)

## Forest fire modeling – limits and possibilities

Models make it possible to investigate the factors which influence forest fires and to measure their importance. Using various forest fire models, the works presented here examine the influence of weather, forest composition, human activity and changes in legislation on the likelihood of forest fire ignitions in Ticino and Valais. A distinction was made between forest fires started by flash of lightning, and those resulting from human activity. The results show that the weather has the greatest influence where lightning starts, whereas in fires caused by people, the weather takes a subordinate place to human activities. Depending on the ignition causes, different weather indices best represent the danger of forest fires: for those caused by lightning, the Duff Moisture Code (DMC) drought index, and for those started by human activity, the Angstrom Index. In order to test the general validity of forest fire ignition models these were applied to Ticino and to Valais over two different periods of time. Results show that transferability of the models is limited, and that their use for the assessment of the future risk of forest fire is difficult under changing climatic conditions. The landscape model LandClim was used in order to simulate the observed patterns of fire frequency and size in Ticino and in Valais. Thanks to further development of the forest fire module, LandClim achieved a marked improvement of model quality. Such dynamic landscape models should have an important role to play in assessing future forest fire regimes.

**Keywords:** logistic regression models, fire-weather indices, lightning-induced fires, human-induced fires, model transfer, landscape model LandClim

**doi:** 10.3188/szf.2010.0433

\* Universitätstrasse 22, CH-8092 Zürich, E-Mail patrick.weibel@alumni.ethz.ch

Unter welchen Bedingungen treten Waldbrände auf, und welche Faktoren bestimmen das Waldbrandregime in verschiedenen Regionen der Schweiz? Diese Fragen interessieren besonders in Regionen, in welchen Waldbrände die Schutzfunktion von Wäldern gefährden, also namentlich in den Alpen. Aber auch in anderen Wäldern beeinträchtigen Waldbrände verschiedene Waldfunktionen wie die Produktion von Rohstoffen, die Speicherung von Wasser und Kohlenstoff sowie die Erholungs- und Tourismusfunktionen von Wäldern. Hingegen können Waldbrände für die Biodiversität je nach Zielorganismen und Zeithorizont der Betrachtung auch positive Auswirkungen haben (Wohlgemuth et al 2005).

Statistische Modelle (z.B. Menard 1995) ermöglichen es, die Einflussfaktoren von Waldbränden zu untersuchen und ihre Bedeutung zu quantifizieren. Die hier vorgestellten Arbeiten haben zum Ziel, die Einflüsse von Umwelt und Menschen auf

die Auslösung von Waldbränden im Tessin und im Wallis zu untersuchen und die Allgemeingültigkeit von Waldbrandmodellen zu testen. Als Einflussfaktoren untersucht werden das Wetter, die Waldzusammensetzung als Mass für das Brandgut, menschliche Aktivitäten im Zusammenhang mit Waldbrandausbrüchen sowie Gesetzesänderungen zur Vermeidung von Waldbränden. Dabei unterscheiden wir zwischen Waldbränden, die natürlich – also durch Blitzschlag (Conedera et al 2006) – ausgelöst werden, und solchen, die durch menschliche Einflüsse verursacht werden.

## Konzeptionelles Modell zum Waldbrandgeschehen

Das konzeptionelle Modell zum Waldbrandgeschehen (Abbildung 1) beschreibt, wie sich Wetter, Topografie, Brandgut und menschliche Aktivi-

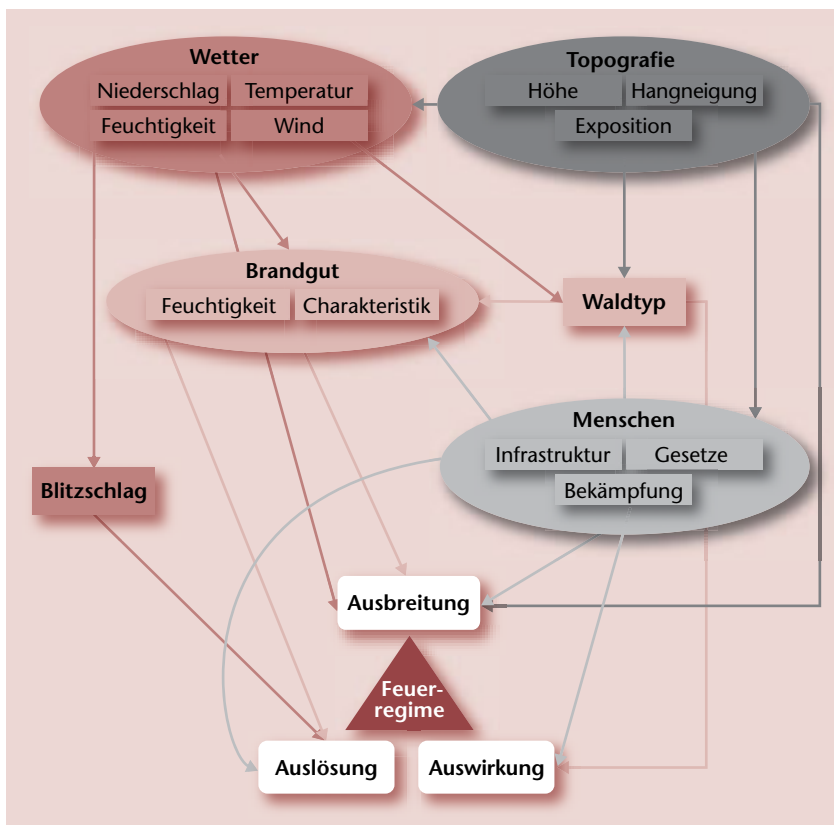


Abb 1 Konzeptionelles Modell zum Waldbrandgeschehen mit den gegenseitigen Einflüssen von Wetter, Brandgut, Topografie und Menschen (Weibel 2009).

täten gegenseitig beeinflussen und welchen Einfluss diese Faktoren auf das Waldbrandregime haben (Weibel 2009). Unter dem Waldbrandregime versteht man Häufigkeit, Grösse und Auswirkungen von Waldbränden in einem Gebiet. Es ist abhängig von der Wahrscheinlichkeit der Feuerauslösung und der Feuerausbreitung sowie von den Eigenschaften des Brandgutes (Johnson 1992).

Das Brandgut bildet das Substrat eines Waldbrandes (Cumming 2001). Seine Zusammensetzung (Charakteristik) und die Anteile an feinem und grobem Material wie Laub, Ästen und abgestorbenen Bäumen sind vom Waldtyp und von der Waldbewirtschaftung abhängig (Hall & Burke 2006). Wichtig ist auch die witterungsabhängige Feuchtigkeit des Brandgutes (Viegas et al 1992). Das Wetter selbst, das durch Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Wind beschrieben werden kann, beeinflusst die Ausbreitung und Intensität eines Feuers (Johnson 1992). Sowohl Waldtyp (Muster et al 2007), als auch Wetter (Sevruk & Miegli 2002) sind von der Topografie abhängig: Meereshöhe, Hangneigung und Exposition beeinflussen Niederschlagsmenge, Temperatur, Sonneneinstrahlung, Windverhältnisse und die Ausbildung von Waldgesellschaften. Die Topografie hat aber auch einen direkten Einfluss auf die Ausbreitung von Waldbränden. Die praktisch einzige natürliche Waldbrandursache sind Blitzschläge. Dies gilt auch für die beiden Untersuchungsgebiete Tessin und Wallis (Conedera et al 2005).

Neben den natürlichen Einflussfaktoren spielen auch die Aktivitäten des Menschen eine wichtige Rolle im Waldbrandregime (Conedera & Tinner 2000). Die Art der Waldbewirtschaftung hat einen Einfluss auf die Waldzusammensetzung, und die Nutzung von Holz und anderen Waldprodukten beeinflusst die Menge und die Zusammensetzung des Brandgutes. Waldbrände können durch Unachtsamkeit und Brandstiftung, aber auch bei land- und forstwirtschaftlichen Aktivitäten oder militärischen Übungen ausgelöst werden. Zur Einschränkung von Waldbränden werden Gesetze erlassen, welche bewirken sollen, dass gefährliche Situationen weniger häufig auftreten. Kommt es dennoch zu einem Waldbrand, werden Grösse und Auswirkungen des Feuers durch die Art der Brandbekämpfung beeinflusst (Bugmann 2005).

## Material und Methoden

### Untersuchungsgebiete Tessin und Wallis

Unsere Untersuchungen konzentrierten sich auf die Kantone Tessin und Wallis, weil es in diesen am stärksten von Waldbränden betroffenen Gebieten der Schweiz eine gute Datengrundlage gibt (Conedera et al 1996, Gimmi et al 2004, Zumbrunnen et al 2009). Wir verwendeten Waldbranddaten aus der schweizerischen Waldbranddatenbank (Pezzatti et al 2005, 2010, dieses Heft). Für die Wetterdaten wurde im Tessin die Meteo-Schweiz-Station Locarno-Monti als Basis verwendet. Der Untersuchungszeitraum wurde auf die Periode von 1969 bis 2005 beschränkt, weil erst ab 1969 hochauflösende (tägliche) Wetterdaten verfügbar sind. Im Wallis diente die Wetterstation Sion als Basis. Für beide Kantone wurden weitere Wetterstationen beigezogen, um die Veränderungen der Wettervariablen aufgrund der Meereshöhe zu erfassen. Für das Tessin waren dies Cimetta, Comprovasco, Lugano, Piotta und Stabio, für das Wallis Aigle, Evölène, Montana, Visp und Zermatt.

Bezüglich Waldzusammensetzung und klimatische Bedingungen unterscheiden sich das Wallis und das Tessin deutlich. Das Wallis wird von Nadelbaumarten, vor allem von Föhren und Fichten, dominiert (Ellenberg & Klötzli 1972) und verfügt über einen Waldflächenanteil von rund 20% der Gesamtfläche. Das Tessin ist zu rund 50% von Wald bedeckt, wobei Laubbaumarten mit einem hohen Anteil an Edelkastanie dominieren (Conedera et al 2004). Das Klima im Wallis ist kontinental geprägt mit trockenen, heissen Sommermonaten und milden, feuchten Wintern. Die klimatischen Bedingungen in den meisten Teilen des Tessins sind insubrisch, also durch heisse, niederschlagsreiche Sommermonate und milde, trockene Wintermonate mit zeitweise längeren Trockenperioden charakterisiert. Zudem gibt es häufig Tage mit Föhnwinden.

Name und Referenz	Formel	Inputvariablen
Munger (Munger 1916)	$munger = \frac{1}{2} \times w^2$	w Anzahl Tage seit dem letzten Tagesniederschlag > 0.05 inch
Nesterov (Nesterov 1949)	$nesterov = \sum_{i=1}^w (T_i - TD_i) \times T_i$	T Temperatur (°C) TD Taupunkttemperatur (°C) w Anzahl Tage seit dem letzten Tagesniederschlag > 3 mm
KBDI, Keetch and Byram Drought Index (Keetch & Byram 1968)	$KBDI = Q + \frac{(800 - Q) \times (0.968 \times e^{0.0486 \times T} - 8.30) \times \Delta t}{1 + 10.88 \times e^{-0.0441 \times PA}} \times 10^{-3}$	Q KBDI des Vortags T Temperatur (°F) $\Delta t$ Zeitinkrement (1 Tag) PA mittlerer Jahresniederschlag (inch)
FFWI, Fosberg Fire Weather Index (Fosberg 1978)	$FFWI = \frac{\eta \times \sqrt{T + U^2}}{0.3002}$	$\eta$ Funktion der Temperatur (°F) und der relativen Luftfeuchtigkeit (%) U Windgeschwindigkeit (mph)
mFFWI, modifizierter FFWI (Goodrick 2002)	$mFFWI = (0.000002 \times KBDI^2 + 0.72) \times FFWI$	siehe FFWI und KBDI
Angstroem (Skvarenina et al 2003)	$angstroem = \left(\frac{RH}{20}\right) + \left(\frac{27 - T}{10}\right)$	RH relative Luftfeuchtigkeit (%) T Temperatur (°C)
LCDI, LandClim Drought Index (Bugmann & Cramer 1998)	siehe Bugmann & Cramer (1998)	Temperatur (°C) potenzielle Evapotranspiration Niederschlag (mm)
FFMC, Fine Fuel Moisture Code ISI, Initial Spread Index FWI, Fire Weather Index DSR, Daily Severity Rating (van Wagner 1987)	siehe van Wagner (1987)	Niederschlag (mm) relative Luftfeuchtigkeit (%) Windgeschwindigkeit (m/s) Temperatur (°C)
DMC, Duff Moisture Code BUI, Buildup Index (van Wagner 1987)	siehe van Wagner (1987)	Niederschlag (mm) relative Luftfeuchtigkeit (%) Temperatur (°C)
DC, Drought Code (van Wagner 1987)	siehe van Wagner (1987)	Niederschlag (mm) Temperatur (°C)

**Tab 1** Übersicht über die verwendeten Trockenheits- und Feuerwetterindizes mit Berechnungsformel, erforderlichen Inputdaten und Referenz für weitere Informationen.

### Statistische Waldbrandausbruchmodelle

Um zu untersuchen, unter welchen Bedingungen im Tessin Waldbrände ausbrechen, verglichen wir mithilfe logistischer Regressionsmodelle Situationen (Raum-Zeit-Einheiten), in denen ein Waldbrand ausgebrochen war, mit Situationen ohne Waldbrandausbruch. Als Raum-Zeit-Einheit bezeichneten wir jede Hektare Wald im Untersuchungsgebiet an jedem Tag während der Untersuchungsperiode. Die räumliche Auflösung der Daten beträgt also eine Hektare, die zeitliche Auflösung einen Tag. Bei unserer Untersuchung betrachteten wir Blitzschlagbrände und von Menschen ausgelöste Waldbrände separat. Um die Situationen mit und ohne Waldbrand zu charakterisieren, verwendeten wir gestützt auf das konzeptionelle Modell zum Waldbrandgeschehen die erklärenden Variablen Wetter, Brandgut und menschliche Einflüsse (Weibel 2009).

Das Wetter wurde durch verschiedene Trockenheits- und Feuerwetterindizes repräsentiert, welche aus den höhenkorrigierten Wetterdaten für Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit berechnet wurden. Ta-

belle 1 zeigt alle Trockenheits- und Feuerwetterindizes, die wir verwendet haben.

Als Mass für das Brandgut unterteilten wir die Waldzusammensetzung in die vier Kategorien (BFS 2001, Hotz et al 2005) Nadelwald (> 90% Anteil an Nadelbaumarten), Nadelmischwald (50–90% Anteil an Nadelbaumarten), Laubmischwald (50–90% Anteil an Laubbaumarten) und Laubwald (> 90% Anteil an Laubbaumarten).

Der menschliche Einfluss wurde mit zwei Variablen miteinbezogen. Zum einen wurde als Mass für die Intensität menschlicher Aktivitäten (Mensch als Zündquelle) die Distanz des Waldes zu menschlicher Infrastruktur wie Strassen, Bahnlinien, Siedlungsgebieten, Industrieflächen und Freizeitanlagen gemessen (Reineking et al 2010). Die erforderlichen Daten wurden der schweizerischen Arealstatistik (Hotz et al 2005) entnommen. Zum anderen wurden die Perioden vor und nach 1990 getrennt betrachtet, weil um 1990 im Tessin zwei Gesetzesänderungen in Kraft traten, die einerseits das Verbrennen von Gartenabfällen im Freien verboten (1989 in Kraft getreten) und andererseits das Abfeuern von Feuer-

werkskörpern am Nationalfeiertag (1. August) bei waldbrandgefährlichen meteorologischen Situationen untersagten (Conedera et al 2004).

Die Auswertung der logistischen Regressionsmodelle basierte auf je einem Datensatz pro Brandursache (Blitzschlag und von Menschen ausgelöst), der alle registrierten Brände mit bekannten Koordinaten und bekanntem Datum sowie eine zufällige Auswahl an Raum-Zeit-Einheiten ohne Waldbrandereignisse enthielt. Mit den logistischen Regressionsmodellen wurden die Einflüsse der vier erklärenden Variablen Wetter, Brandgut, Mensch (Distanz zwischen Infrastruktur und Brandausbruch) und Periode (vor und nach 1990) in Situationen mit und ohne Waldbrand untersucht. Dabei wurden die am besten geeigneten Trockenheits- und Feuerwetterindizes und die unabhängigen Effekte von Wetter, Brandgut und Mensch bestimmt (Reineking et al 2010).

### Übertragbarkeit von Waldbrandausbruchmodellen

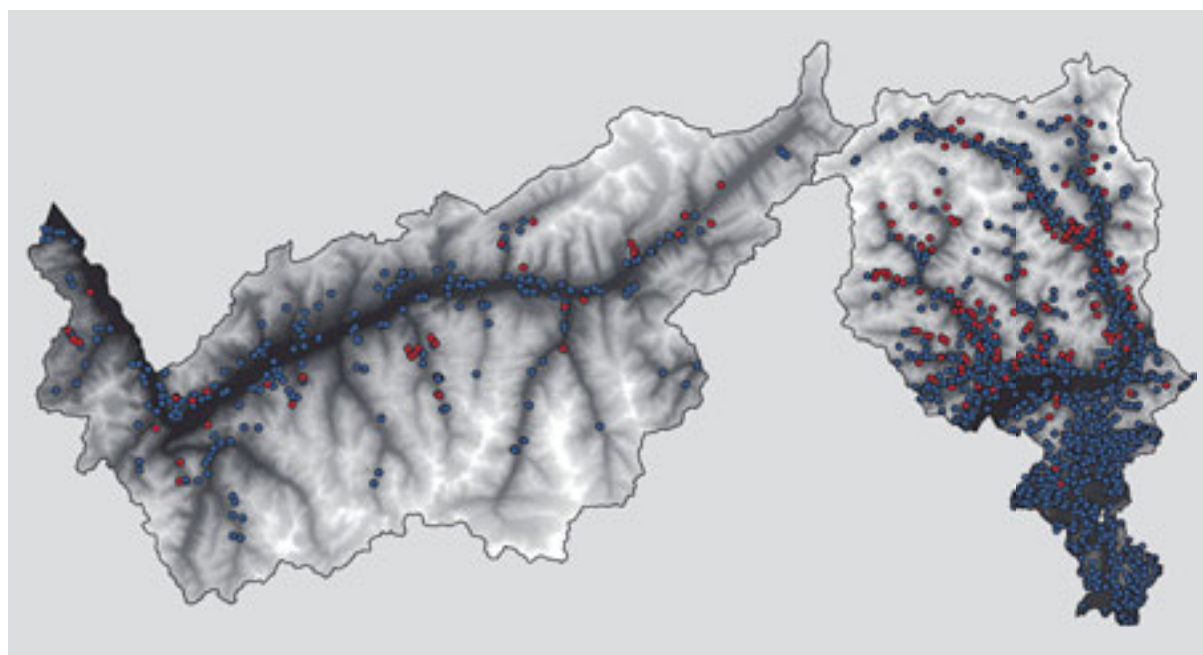
Um die Gültigkeit der Waldbrandausbruchmodelle zu testen, übertrugen wir die logistischen Regressionsmodelle zwischen dem Tessin und dem Wallis sowie zwischen den beiden Perioden 1974 bis 1989 und 1990 bis 2005. Diese Modellübertragungen in Raum und Zeit geben einen Hinweis darauf, ob die Waldbrandausbruchmodelle geeignet sind, um Vorhersagen unter veränderten klimatischen Bedingungen zu machen.

Für die Übertragbarkeitsstudie im Raum wurden die logistischen Waldbrandausbruchmodelle in einer Region (Trainingsdaten) entwickelt und in der anderen Region (Testdaten) getestet, wobei die Zeitperiode konstant gehalten wurde. Wir testeten vier

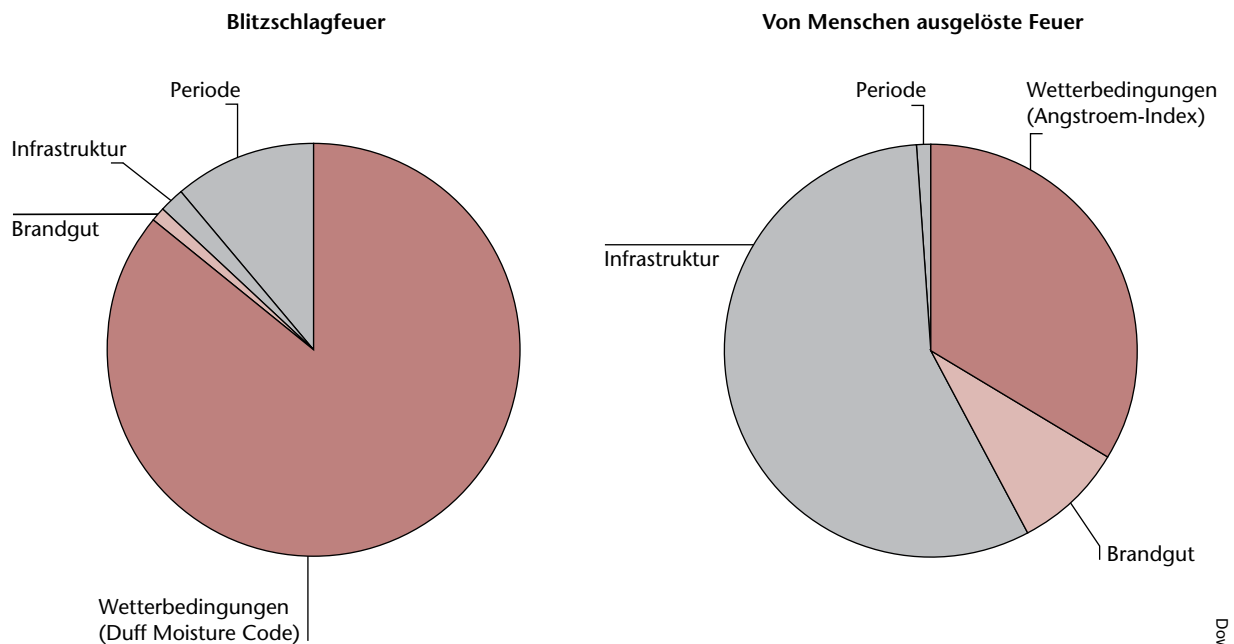
Übertragungssituationen im Raum: in der Periode vor und nach 1990, jeweils in beide Richtungen zwischen Tessin und Wallis. Für den Test der zeitlichen Übertragbarkeit wurden die Modelle in einer Periode (Trainingsdaten) entwickelt und in der anderen Periode (Testdaten) getestet, wobei die Region konstant gehalten wurde. Daraus resultierten vier weitere Übertragungssituationen in der Zeit. Insgesamt wurden also acht Modellübertragungen getestet (Weibel 2009). Als Mass für die Güte eines Modells bezüglich der Trainings- sowie der Testdaten wurde die True Skill Statistic (TSS) verwendet (Allouche et al 2006), die analog dem Korrelationskoeffizienten  $R^2$  zwischen 0 und 1 skaliert ist. TSS-Werte  $> 0.75$  zeigen exzellente Modellgüte an, TSS-Werte zwischen 0.4 und 0.75 gute Güte und TSS-Werte  $< 0.4$  schwache Güte. Hohe TSS-Werte bezüglich der Trainingsdaten zeigen, dass ein Modell unter der ursprünglichen Konstellation geeignet ist, um zwischen Situationen mit und ohne Waldbrandausbrüche zu unterscheiden. Hohe TSS-Werte bezüglich der Testdaten zeigen, dass ein Modell auch unter der neuen Konstellation dafür geeignet ist.

### Dynamisches Landschaftsmodell LandClim

Das dynamische Landschaftsmodell LandClim ist ein rasterbasiertes, räumlich explizites, stochastisches Modell, welches zum Ziel hat, die Waldentwicklung unter den Einflüssen von Waldbränden, Windwürfen und Waldbewirtschaftung zu simulieren. LandClim wurde an der Professur Waldökologie der ETH Zürich entwickelt und verfügt über ein Waldbrandmodul (Schumacher & Bugmann 2006, Schumacher et al 2006). Die Waldbrandauslösung und die Waldbrandausbreitung sind von der Feuerwahrscheinlichkeit abhängig. Diese wird mittels



**Abb 2** Geografische Verteilung der Waldbrandausbrüche im Wallis und im Tessin während der Periode von 1969 bis 2005. Total wurden im Wallis 346 Waldbrände, im Tessin 2828 registriert. Rote Punkte bezeichnen Blitzschlagbrände, blaue Punkte von Menschen ausgelöste Waldbrände.



**Abb 3** Anteile der unabhängigen Effekte der erklärenden Variablen in den Waldbrandausbruchmodellen für das Tessin: Wetterbedingungen (Duff Moisture Code, DMC, bzw. Angstroem-Index), Waldzusammensetzung (Brandgut), Distanz zu menschlicher Infrastruktur als Mass für den menschlichen Einfluss (Infrastruktur) und Gesetzesänderungen (Periode) bei Blitzschlagfeuern (links) und von Menschen ausgelösten Feuern (rechts). Die Farben entsprechen jenen des konzeptionellen Modells des Waldbrandgeschehens in Abbildung 1.

einer exponentiellen Funktion aus den Werten eines Trockenheitsindex berechnet. In LandClim wird der eigens entwickelte LandClim-Trockenheitsindex (LCDI, Tabelle 1) verwendet. Das Waldbrandmodul wurde für die vorliegende Arbeit weiterentwickelt, indem verschiedene Anpassungen und Erweiterungen vorgenommen wurden (Weibel 2009):

- die Werte der Trockenheitsindizes wurden täglich berechnet;
- der Angstroem-Index wurde integriert;
- die exponentielle Funktion, welche die Werte der Trockenheitsindizes in Feuerwahrscheinlichkeiten umrechnet, wurde in eine sigmoide Funktion umgewandelt;
- minimale und maximale Feuerwahrscheinlichkeiten wurden eingeführt.

Wir verwendeten LandClim mit dem weiterentwickelten Waldbrandmodul, um die beobachteten Muster der Feuerhäufigkeit und -grösse im südlichen Zentralwallis und in der Leventina (Tessin) für den Zeitraum von 1970 bis 2000 zu simulieren und die Simulationsergebnisse den Beobachtungen gegenüberzustellen.

## Resultate und Diskussion

### Blitzschlagfeuer und vom Menschen ausgelöste Feuer

In der Untersuchungsperiode wurden im Tessin insgesamt 2828 lokalisierte Waldbrandereignisse registriert (2.14 Waldbrände pro km<sup>2</sup> Wald), im Wallis deren 346 (0.33 Waldbrände pro km<sup>2</sup> Wald). Die

Häufigkeit der Brände pro Waldfläche unterscheidet sich demnach um den Faktor 6.5. Die Anteile an natürlichen und durch menschliche Aktivitäten ausgelösten Feuern hingegen sind in beiden Kantonen sehr ähnlich: im Wallis wurden 12% der Brände durch Blitzschlag und 88% durch den Menschen ausgelöst, wogegen im Tessin 7% der Brände durch Blitzschlag und 93% durch den Menschen verursacht wurden (Abbildung 2).

Die Resultate der logistischen Regressionsmodelle für die Unterscheidung zwischen Situationen mit und ohne Waldbrand im Tessin zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Brandursachen. Die Einflüsse der untersuchten Faktoren Wetter, Brandgut und menschliche Einflüsse waren zwischen den natürlich und den von Menschen ausgelösten Waldbränden deutlich verschieden (Abbildung 3). Blitzschlagbrände liessen sich zu 86% durch das Wetter erklären, wogegen von Menschen ausgelöste Feuer auf eine Kombination von menschlichen Aktivitäten (57%) und Wetter (34%) zurückgeführt werden können. Bei den Unterschieden bezüglich Perioden ist zu beachten, dass neben den Gesetzesänderungen auch die unterschiedlichen Witterungsbedingungen vor und nach 1990 eine Rolle spielen.

Je nach Brandursache repräsentierten verschiedene Wetterindizes die Waldbrandgefahr besonders gut. Bei Blitzschlagbränden war der Trockenheitsindex Duff Moisture Code (DMC) des kanadischen Waldbrandindizes-Systems (van Wagner 1987) besonders geeignet (Tabelle 2). Dieser Index repräsentiert die Feuchtigkeit des Oberbodens und ist somit ein Mass für das Bodenwasserdefizit und indirekt

Blitzschlagbrände			Von Menschen ausgelöste Brände		
Index	AIC	AUC	Index	AIC	AUC
DMC	1422	0.886	Angstroem	9705	0.867
BUI	1425	0.883	FFWI	9731	0.865
LCDI	1362	0.883	ISI	9783	0.859
KBDI	1393	0.882	mFFWI	10002	0.856
FWI	1398	0.879	FFMC	10015	0.855

**Tab 2** Eignung von Trockenheits- und Feuerwetterindizes für Blitzschlagbrände und von Menschen ausgelöste Waldbrände. Je kleiner die AIC-Werte (Akaike Information Criterion) und je grösser die AUC-Werte (Area under the curve), desto besser ist das logistische Regressionsmodell mit dem entsprechenden Index geeignet, um zwischen Situationen mit und ohne Waldbrand zu unterscheiden.

auch für die Feuchtigkeit der brennbaren Humuskomponenten. Für Waldbrände, die vom Menschen ausgelöst wurden, war der Angstroem-Index (Skvarnina et al 2003) am besten geeignet (Tabelle 2). Dieser Index ist eine lineare Funktion aus Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit und kann als Mass für die Feuchtigkeit des Brandguts interpretiert werden.

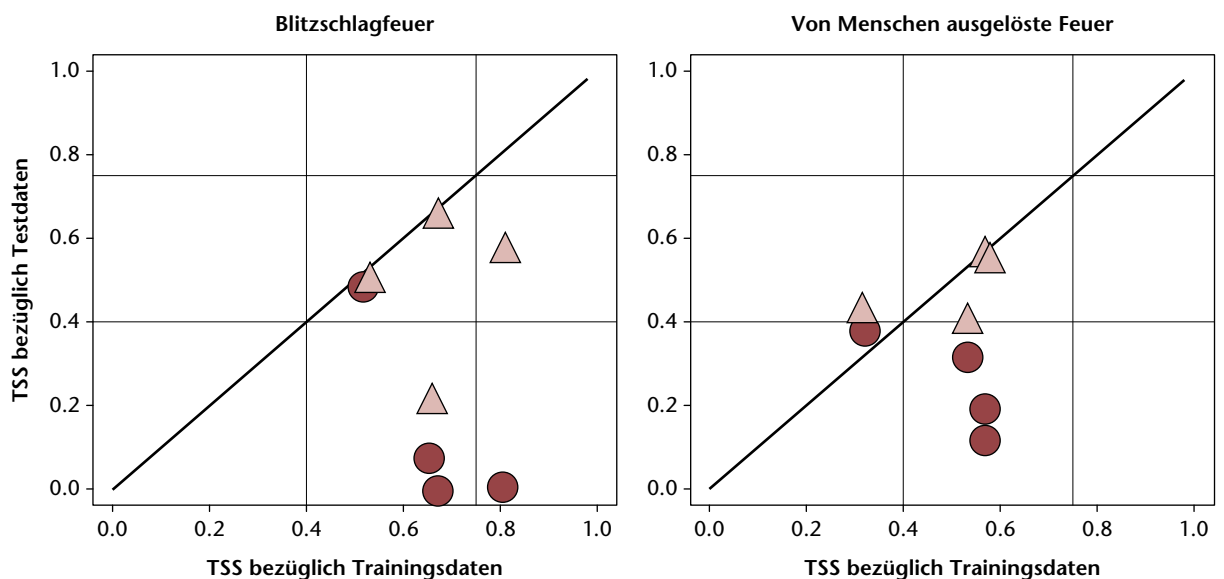
Die unterschiedliche Eignung der Wetterindizes bei Blitzschlagfeuern und von Menschen ausgelösten Feuern beweist, dass sich die Wetterbedingungen für die beiden Brandursachen deutlich unterscheiden. Unsere Resultate zeigen, dass Blitzschlagbrände nur unter sehr spezifischen Wetterbedingungen während längeren, heissen Trockenperioden mit Gewittern ausbrechen. Dabei entzünden Blitzschläge das trockene, feine Brandgut, wobei nach der Brandauslösung nicht zu grosse Mengen an Niederschlägen fallen dürfen. Im Gegensatz dazu treten vom Menschen ausgelöste Waldbrände unter verschiedenen Wetterbedingungen auf. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass menschliche Ak-

tivitäten nicht so stark vom Wetter abhängig sind und dass bei einer Brandauslösung durch Menschen genügend Zündenergie freigesetzt wird, sodass auch feuchteres Brandgut entflammt werden kann.

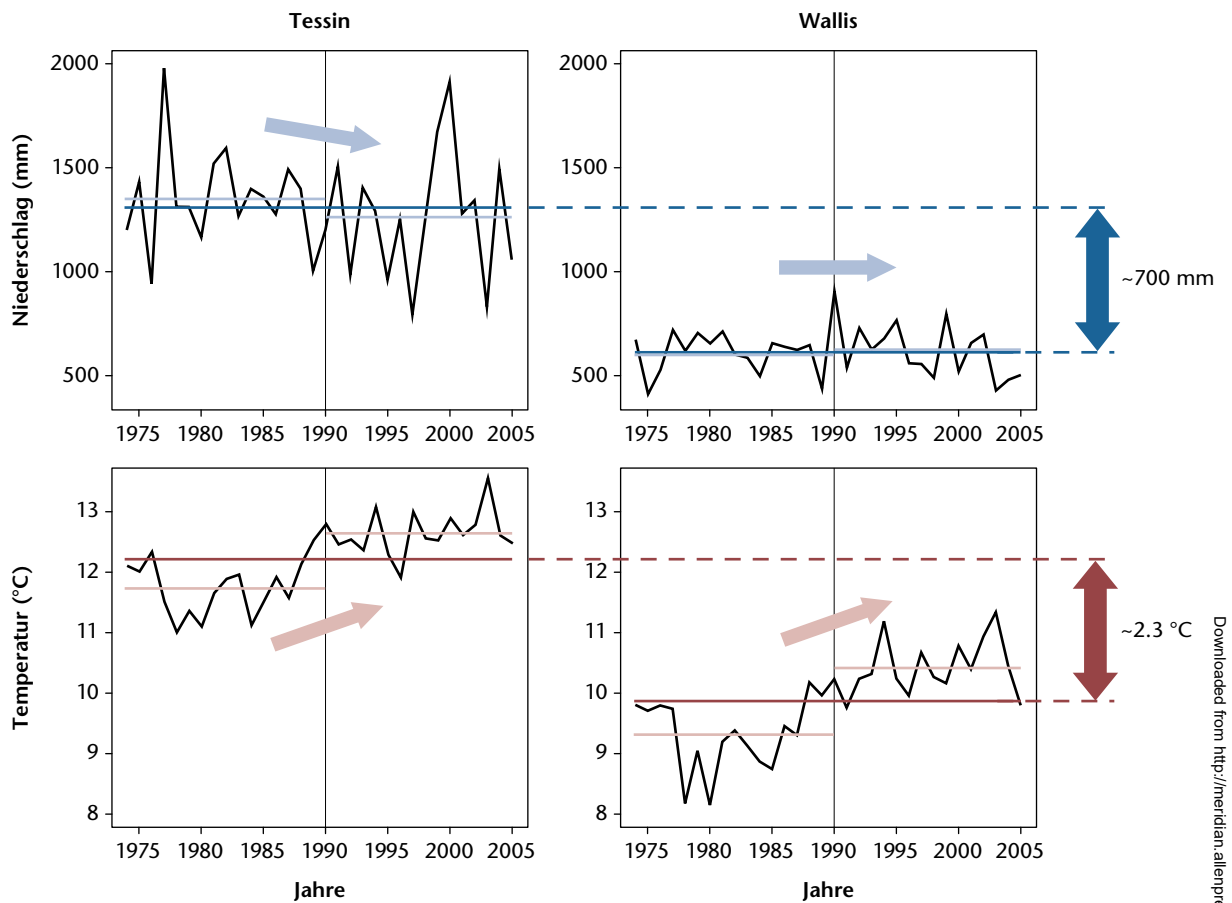
### Übertragbarkeit von Waldbrandausbruchmodellen

Die Resultate der Übertragbarkeitsstudie sind in Abbildung 4 dargestellt, wo separat für Blitzschlagfeuer und von Menschen ausgelöste Feuer die TSS-Werte der Trainings- und der Testdaten gegeneinander aufgetragen sind. Die Resultate zeigen, dass die Übertragbarkeit der Modelle in Raum und Zeit eingeschränkt ist. Die niedrigen TSS-Werte bezüglich der Testdaten bei den Modellübertragungen im Raum zeigen, dass Modelle, die in einer der beiden Regionen entwickelt wurden, nicht ohne Modifikation in der anderen Region angewendet werden können (schwache Modellgüte). Hingegen zeigen die relativ hohen TSS-Werte bezüglich der Testdaten bei den Modellübertragungen in der Zeit, dass Modelle, die in einer der beiden Perioden entwickelt wurden, auch auf die anschliessende Periode in derselben Region angewendet werden können (gute Modellgüte).

Die Erklärung für die Übertragbarkeit in der Zeit und die fehlende Übertragbarkeit im Raum liegt in den erheblichen klimatischen Unterschieden (insbesondere bei den Temperaturen und Niederschlägen) zwischen dem Tessin und dem Wallis (Abbildung 5). Das Temperaturniveau liegt im Tessin etwa 2.3 °C höher als im Wallis. Zudem fallen im Tessin pro Jahr rund 700 mm mehr Niederschläge als im Wallis. Die klimatischen Unterschiede zwischen den Perioden innerhalb einer Region hingegen sind bedeutend kleiner. Hinzu kommen die unterschiedliche Baumartenzusammensetzung mit Nadelholz-



**Abb 4** Modellübertragungen. Darstellung der TSS-Werte (True Skill Statistic) bezüglich der Trainings- und Testdaten. Kreise bezeichnen Modellübertragungen im Raum, also zwischen Wallis und Tessin, Dreiecke solche zwischen den Perioden, also zwischen der Zeit von 1974 bis 1989 und der Zeit von 1990 bis 2005. TSS-Werte > 0.75 = exzellente Modellgüte, zwischen 0.4 und 0.75 = gute Güte, < 0.4 = schwache Güte.



**Abb 5** Verlauf der jährlichen Niederschlagssumme und der mittleren Jahrestemperatur im Tessin (links) und im Wallis (rechts). Die hellen Linien zeigen den mittleren Jahresniederschlag beziehungsweise die mittlere Jahrestemperatur in den Perioden vor und nach 1990, die dunklen Linien den mittleren Jahresniederschlag beziehungsweise die mittlere Jahrestemperatur über den gesamten Untersuchungszeitraum von 1974 bis 2005. Die hellen Pfeile zeigen die Trends der Niederschlags- und Temperaturentwicklung zwischen den Perioden vor und nach 1990. Die dunklen Pfeile markieren die Differenzen zwischen dem Tessin und dem Wallis.

dominanz im Wallis und Laubholzdominanz im Tessin sowie der grosse Unterschied beim Waldanteil an der Gesamtfläche (20% im Wallis, 50% im Tessin). Die räumliche Verteilung der menschlichen Infrastruktur ist vergleichbar, wobei sich in beiden Regionen die meisten menschlichen Aktivitäten auf die Tallagen konzentrieren.

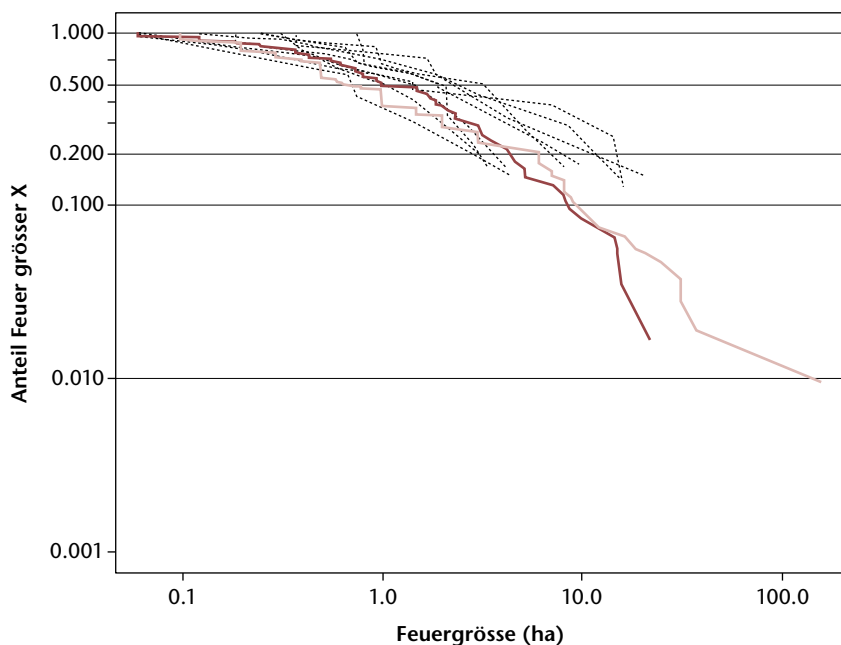
#### Dynamisches Landschaftsmodell LandClim

Unsere Simulationen zeigen, dass LandClim mit geeigneter Parametrisierung in der Lage ist, die im Tessin und im Wallis beobachteten Muster von Waldbrandhäufigkeit und -grösse wiederzugeben (Abbildung 6). Dank den Weiterentwicklungen erzielte LandClim merkliche Verbesserungen der Modellgüte (Weibel 2009). Somit dürften dynamische Landschaftsmodelle wie LandClim bei der Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Waldbrandregime eine wichtige Rolle spielen.

#### Schlussfolgerungen

Für die Forstpraxis können aus den vorliegenden Arbeiten einige Schlüsse gezogen werden. Die

Unterscheidung zwischen verschiedenen Brandursachen – in unserem Fall zwischen Blitzschlag und menschlichen Aktivitäten – ist notwendig, da deutliche Unterschiede in der Bedeutung des Wetters, der Waldzusammensetzung und des menschlichen Einflusses erkannt wurden. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass Feuerwetterindizes hilfreiche Grössen für die Abschätzung des Gefahrenpotenzials für Waldbrände sind. Solche Indizes können aus meteorologischen Grössen wie Temperatur, Niederschlag und relativer Luftfeuchtigkeit einfach berechnet werden und geben in einer einzigen Zahl die potenzielle Waldbrandgefahr an (Kaltenbrunner 2010, dieses Heft). Es ist aber von grossem Vorteil, wenn für die Gefahrenbeurteilung je nach Zündquelle differenzierte Indizes verwendet werden, was heute noch nicht Standard ist. Schliesslich können Waldbrandausbruchmodelle als Ergänzung zu Waldbrandkartierungen auch hilfreich sein, um die Lösinfrastruktur wie zum Beispiel den Standort von Löschbecken zu optimieren. Die räumliche Verteilung menschlicher Infrastruktur und die Kontaktzonen zwischen Wald und menschlicher Infrastruktur widerspiegeln die räumliche Verteilung der ausgelösten Waldbrände. Von Menschen ausgelöste



**Abb 6** Feuergrössenverteilung mit zehn Simulationen (Wiederholungen mit stochastischem Einfluss) durch LandClim (gestrichelte Linien) in der Leventina (TI) für den Zeitraum von 1970 bis 2000. Dunkelbraune Linie: mittlere simulierte Feuergrössenverteilung, hellbraune Linie: beobachtete Feuergrössenverteilung.

Waldbrände treten sehr häufig in unmittelbarer Nähe von menschlicher Infrastruktur auf.

Aus Sicht der Forschung ist es wichtig, dass Modelle je nach Situation und Brandauslöser entwickelt und angepasst werden. Die Übertragbarkeit einfacher statistischer Modelle ist – wie hier gezeigt – allerdings mindestens vorderhand eingeschränkt, wobei insbesondere die räumliche Übertragung in unserem Fallbeispiel nicht möglich war. Hingegen sind Modellübertragungen in der Zeit möglich, weil die Unterschiede der Wetterverhältnisse über die Zeit weniger gross sind als zwischen verschiedenen Regionen. Schliesslich bietet sich mit dynamischen Landschaftsmodellen wie LandClim die Möglichkeit, dass Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Waldbrandregime untersucht werden können, indem die Häufigkeit und Grösse von Waldbränden unter verschiedenen Klimaszenarien simuliert werden.

Eingereicht: 2. März 2010, akzeptiert (mit Review): 20. Mai 2010

## Literatur

- ALLOUCHE O, TSOAR A, KADMON R (2006) Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *J Appl Ecol* 43: 1223–1232.
- BFS (2001) Waldmischungsgrad der Schweiz. Neuchâtel: Bundesamt Statistik, interner Bericht. 12 p.
- BUGMANN H (2005) Waldbrände in der Schweiz: Gestern, heute – und morgen? *Schweiz Z Forstwes* 156: 323–324. doi 10.3188.szf.2005.0323
- BUGMANN H, CRAMER W (1998) Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients. *For Ecol and Manage* 103: 247–263.

- 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 (1996) Incendi boschivi al Sud delle Alpi: passato, presente e possibili sviluppi futuri. Zürich: VDF. 143 p.
- CONEDERA M, CESTI G, KALTENBRUNNER A, PEZZATTI B (2005) Die Blitzschlagbrände in den Alpen. *Bündnerwald* 58 (6): 65–66.
- CONEDERA M, CESTI G, PEZZATTI B, ZUMBRUNNEN T, SPINEDI F (2006) Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. [www.fire.uni-freiburg.de/GlobalNetworks/EuroAlpine/Conedera-et-al-2006.pdf](http://www.fire.uni-freiburg.de/GlobalNetworks/EuroAlpine/Conedera-et-al-2006.pdf) (31.8.10)
- 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*. Dordrecht: Kluwer. pp. 247–261.
- CUMMING SG (2001) Forest type and wildfire in the Alberta boreal mixedwood: What do fires burn? *Ecol Appl* 11: 97–110.
- ELLENBERG H, KLÖTZLI F (1972) Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. *Mitt Schweiz Anst Forstl Versuchsw* 48: 589–930.
- FOSBERG MA (1978) Weather in wildland fire management: the fire weather index. In: *Proc Conference on Sierra Nevada Meteorology*. 19–21 June 1978, South Lake Tahoe. Boston: American Meteorological Society. pp. 1–4.
- GIMMI U, BÜRGI M, WOHLGEMUTH T (2004) Wie oft brannte der Walliser Wald im 19. und 20. Jahrhundert? *Schweiz Z Forstwes* 155: 437–440. doi: 10.3188/szf.2004.0437
- GOODRICK SL (2002) Modification of the Fosberg fire weather index to include drought. *Int J Wildland Fire* 11: 205–211.
- HALL SA, BURKE IC (2006) Considerations for characterizing fuels as inputs for fire behavior models. *Forest Ecol Manage* 227: 102–114.
- HOTZ MC, WEIBEL F, RINGGENBERG B (2005) Arealstatistik Schweiz: Zahlen, Fakten, Analysen. Neuenburg: Bundesamt Statistik. 99 p.
- JOHNSON EA (1992) Fire and vegetation dynamics: Studies from the North American boreal forest. Cambridge: Cambridge Univ Press. 129 p.
- KALTENBRUNNER (2010) Waldprävention im Kanton Graubünden. *Schweiz Z Forstwes* 161: 460–464. doi: 10.3188/szf.2010.0460
- KEETCH JJ, BYRAM GM (1968) A drought index for forest fire control. Asheville: US Dept Agriculture, Forest Service Research Paper SE-38. 35 p.
- MENARD S (1995) Applied Logistic Regression Analysis. Thousand Oaks: Sage. 98 p.
- MUNGER TT (1916) Graphic method of representing and comparing drought intensities. *Mon Weather Rev* 44: 642–643.
- MUSTER S, ELSENBEEER H, CONEDERA M (2007) Small-scale effects of historical land use and topography on post-cultural tree species composition in an Alpine valley in southern Switzerland. *Landscape Ecol* 22: 1187–1199.
- NESTEROV VG (1949) Combustibility of the forest and methods for its determination (in Russian). Moscow: USSR State Industry Press.
- PEZZATTI ET AL (2010) Swissfire: die neue schweizerische Waldbranddatenbank. *Schweiz Z Forstwes* 161: 465–471. doi: 10.3188/szf.2010.0465
- PEZZATTI B, CONEDERA M, KALTENBRUNNER A (2005) Die neue Waldbranddatenbank. *Bündnerwald* 58 (6): 37–39.



- REINEKING B, WEIBEL P, CONEDERA M, BUGMANN H (2010) Environmental determinants of lightning- and human-induced forest fire ignitions differ in a temperate mountain region of Switzerland. *Int J Wildland Fire* 19: 541–557.
- SCHUMACHER S, BUGMANN H (2006) The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. *Glob Chang Biol* 12: 1435–1450.
- SCHUMACHER S, REINEKING B, SIBOLD J, BUGMANN H (2006) Modeling the impact of climate and vegetation on fire regimes in mountain landscapes. *Landscape Ecol* 21: 539–554.
- SEVRUK B, MIEGLITZ K (2002) The effect of topography, season and weather situation on daily precipitation gradients in 60 Swiss valleys. *Water Sci Technol* 15: 41–48.
- SKVARENINA J, MINDAS J, HOLECY J, TUCEK J (2003) Analysis of the natural and meteorological conditions during two largest forest fire events in the Slovak Paradise National Park. [www.fria.gr/WARM/chapters/warmCh04Skvarenina.pdf](http://www.fria.gr/WARM/chapters/warmCh04Skvarenina.pdf) (31.8.10)
- VAN WAGNER CE (1987) Development and structure of the Canadian forest fire weather index system. Ottawa: Canadian Forestry Service, Forest Technical Report 35. 37 p.
- VIEGAS DX, VIEGAS MTSP, FERREIRA AD (1992) Moisture content of fine fuels and fire occurrence in central Portugal. *Int J Wildland Fire* 2: 69–86.
- WEIBEL P (2009) Modelling and assessing fire regimes in mountain forests of Switzerland. Zürich: ETH Zürich, PhD thesis. 140 p.
- WOHLGEMUTH T ET AL (2005) Ökologische Resilienz nach Feuer: Die Waldbrandfläche Leuk als Modellfall. *Schweiz Z Forstwes* 156: 345–352. doi: 10.3188/szf.2005.0345
- ZUMBRUNNEN T, BUGMANN H, CONEDERA M, BÜRGI M (2009) Linking forest fire regimes and climate – a historical analysis in a dry inner alpine valley. *Ecosystems* 12: 73–86.

## Waldbrandmodellierung – Möglichkeiten und Grenzen

Modelle ermöglichen es, die Einflussfaktoren von Waldbränden zu untersuchen und ihre Bedeutung zu quantifizieren. Die vorgestellten Arbeiten untersuchten anhand von verschiedenen Waldbrandmodellen die Einflüsse von Wetter, Waldzusammensetzung, menschlichen Aktivitäten und Gesetzesänderungen auf die Ausbruchswahrscheinlichkeit von Waldbränden im Tessin und im Wallis. Dabei wurde zwischen Blitzschlagbränden und von Menschen ausgelösten Waldbränden unterschieden. Die Resultate zeigen, dass bei Blitzschlagbränden das Wetter den grössten Einfluss hat, wogegen bei von Menschen ausgelösten Feuern neben den Wetterbedingungen die menschlichen Aktivitäten den grössten Einfluss haben. Je nach Brandursache repräsentieren verschiedene Wetterindizes die Waldbrandgefahr am besten: bei Blitzschlagbränden der Trockenheitsindex Duff Moisture Code (DMC), für Waldbrände, die vom Menschen ausgelöst wurden, der Angstroem-Index. Um die Allgemeingültigkeit von Waldbrandausbruchmodellen zu testen, wurden diese zwischen dem Tessin und dem Wallis sowie zwischen zwei Zeitperioden übertragen. Die Resultate zeigen, dass eine Übertragbarkeit der Modelle nur begrenzt möglich und deren Einsatz für die Abschätzung der zukünftigen Waldbrandgefahr unter veränderten klimatischen Bedingungen schwierig ist. Das Landschaftsmodell LandClim wurde verwendet, um die beobachteten Muster der Feuerhäufigkeit und -grösse im Tessin und im Wallis zu simulieren. Dank der Weiterentwicklung des Waldbrandmoduls erzielte LandClim merkliche Verbesserungen in der Modellgüte. Solche dynamischen Landschaftsmodelle dürften bei der Abschätzung der zukünftigen zu erwartenden Waldbrandregime eine wichtige Rolle spielen.

## Modélisation des incendies de forêt: potentiels et limites

Les modèles permettent d'examiner les facteurs déterminants des incendies de forêt et de quantifier leur importance. Les travaux présentés dans cet article ont, à l'aide de plusieurs modèles, examiné l'influence des conditions météorologiques, de la composition de la forêt, des activités humaines et des changements législatifs sur la probabilité d'apparition d'un incendie dans les cantons du Tessin et du Valais. A cet effet, les incendies causés par la foudre et ceux causés par l'humain ont été différenciés. Les résultats démontrent l'importance des conditions météorologiques dans les cas d'incendies causés par la foudre, doublée par le facteur «activités humaines» dans le cas des incendies déclenchés par l'homme. Différents indices météorologiques sont appropriés pour représenter le danger d'incendie selon l'origine de ceux-ci: l'indice de sécheresse, Duff Moisture Code (DMC), est le plus performant pour les incendies causés par la foudre. L'indice d'Angstroem est, quant à lui, utilisé pour les incendies de cause anthropogène. Afin de vérifier la validité des modèles de déclenchement d'incendies, ceux-ci ont été reportés du Tessin en Valais et entre deux périodes. Les résultats font apparaître que la transmissibilité des modèles est limitée et que leur usage pour prédire les dangers d'incendies à venir, dans un contexte climatique changeant, est difficile. Le modèle de paysage, LandClim, a été utilisé pour simuler la fréquence et l'étendue des incendies observés au Tessin et en Valais. Grâce au développement du module d'incendies de forêt, LandClim a pu améliorer la qualité de la modélisation. Ce genre de modèles de paysage dynamiques joueront un rôle important dans l'appréciation des régimes d'incendies de forêt à venir.